

搭接长度和铺层方式对 CFRP 复合材料层合板胶接结构连接性能和损伤行为的影响

毛振刚, 侯玉亮, 李成*, 铁瑛, 孙李刚

(郑州大学 机械与动力工程学院, 郑州 450001)

摘 要: 针对不同搭接长度和铺层方式的碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料层合板单搭接胶接结构进行了拉伸试验, 观察了试件的受力过程和失效形态, 获得了载荷-位移曲线; 同时基于连续损伤力学模型和三维 Hashin 失效准则模拟了 CFRP 复合材料层合板的层内损伤形成和演化, 并利用内聚力模型来模拟层间及胶层的失效损伤, 对 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构在拉伸作用下的失效强度和损伤机制进行了预测, 通过对比验证了该数值方法的有效性; 通过数值试验比较不同搭接长度和铺层方式的单搭接胶接结构及双搭接胶接结构的连接强度和损伤行为, 并提出了一种优化的 CFRP 复合材料层合板胶接结构。结果表明: CFRP 复合材料层合板胶接结构的极限失效载荷随着搭接长度的增大逐渐增加并趋于稳定值, 且结构的失效形式逐渐从胶层自身剪切失效过渡到邻近胶层的层合板层间分层失效; CFRP 复合材料层合板胶接结构的连接强度和损伤行为随着铺层方式的不同而改变, 通过对 3 种铺层方式的对比和分析, 得到性能最好的铺层方式是 $[0_3/90_3]_{2S}$; 在搭接长度为 5~20 mm 时, 通过对搭接长度进行优化, 得到单搭接胶接结构的最优搭接长度是 17 mm, 双搭接胶接结构的最优搭接长度是 19.3 mm, 与搭接长度为 20 mm 相比, 单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的连接强度分别提高了 13.26% 和 0.43%。

关键词: CFRP; 复合材料; 层合板; 胶接结构; 搭接长度; 铺层方式; 连接强度

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)01-0121-11

Effect of lap length and stacking sequence on strength and damage behaviors of adhesively bonded CFRP composite laminates

MAO Zhengang, HOU Yuliang, LI Cheng*, TIE Ying, SUN Ligang

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The experimental tensile tests have been performed on adhesively bonded single-lap joints of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) composite laminates with different lap lengths and stacking sequences. The relevant mechanical responses and damage behaviors were observed during the test process. Finite element (FE) models were built, in which the intralaminar damage was captured using the continuum damage mechanics (CDM) theory derived from 3D Hashin damage criteria, and the delamination of CFRP composite laminates as well as the failure of adhesive were simulated by cohesive zone model (CZM). The numerical prediction is in a good agreement with the experimental results, which validates the numerical modeling strategy. The effect of lap length and stacking sequence on the bonding strength and damage behaviors was investigated for adhesively bonded joints with single-lap and double-lap configurations. The optimization configuration was obtained using the numerical simulation for adhesively bonded joint of CFRP composite laminates. The results show that the ultimate failure load rises with the increase of the lap length for both single-lap and double-lap configurations, and it finally tends to be a stable value. The failure modes of the joints gradually transform from the shear failure within adhesive film to the delamination within laminates adjacent to the adhesive film. The bonding strength and failure modes also change as the stacking sequence varies, and the optimal stacking sequence is obtained as $[0_3/90_3]_{2S}$ by comparing and analysing three stacking se-

收稿日期: 2019-01-03; 录用日期: 2019-02-26; 网络出版时间: 2019-03-12 13:49

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190308.001>

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U1833116); 国家博士后科学基金面上资助项目(2018M642775)

通讯作者: 李成, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料损伤分析和复合材料损伤检查 E-mail: chengli@zzu.edu.cn.

引用格式: 毛振刚, 侯玉亮, 李成, 等. 搭接长度和铺层方式对 CFRP 复合材料层合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 Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 121-131 (in Chinese).

quences. When the lap length varies in the range of 5—20 mm, the optimum is obtained as 17 mm for single-lap configuration, and that value is 19.3 mm in the double-lap case. Compared with joint with the lap length of 20 mm, the bonding strengths of adhesively bonding single-lap and double-lap joints are increased by 13.26% and 0.43%, respectively.

Keywords: CFRP; composite; laminates; adhesively bonded structure; lap length; stacking sequence; bonding strength

为了预测碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料层合板胶接结构在不同载荷作用下的损伤起始和演化过程,国内外学者对其进行了一定的试验研究,并提出了相应的数值模型来预测其失效强度和损伤失效行为。

近年来,大量的研究基于 Hashin 失效准则、内聚力模型和刚度退化模型,针对复合材料胶接结构建立了二维和三维有限元模型,比较和分析了不同参数胶接结构的连接性能^[4-10]。研究表明:胶接结构的连接性能与搭接长度、搭接厚度和铺层方式等因素有关^[11-19]。邓雅琼等^[20]研究了胶层厚度和搭接长度对三维编织复合材料与金属胶接结构的影响,并提出一种新型的胶接结构。Campilho 等^[21]采用标准和扩展两种有限元模型对单搭胶接结构和双搭胶接结构进行强度预测,评价了两种方法的优劣性。Sulu^[22]研究了铺层角度、搭接长度和宽度对插入式双搭胶接结构的影响,并确定了最有效的搭接参数。Budhe 等^[23]对复合材料胶接结构进行了综述,讨论了直接或间接影响胶接结构性能的参数。Tie 等^[24]研究了补片形状和大小对低速冲击载荷作用下 CFRP 复合材料单面修补结构的影响。Ye 等^[25]建立了三种参数化有限元模型,研究了不同搭接长度 CFRP 复合材料单搭胶接结构的拉伸破坏模式,并通过与试验结果对比,从载荷-位移曲线和破坏形态等方面综合论述了三种模型的精度、效率和适用性。但对于 CFRP 复合材料层合板胶接结构的优化研究很少,本文针对 T300/7901 CFRP 复合材料层合板胶接结构进行了研究。

本研究通过数值模拟和试验研究,分析了搭接长度和铺层方式对 CFRP 复合材料层合板胶接结构连接强度和失效形式的影响,验证了数值模拟的有效性,并提出一种优化的胶接结构。

1 试验材料及方法

1.1 复合材料制备

选取机械结构中常见的 T300/7901 碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料层合板来制备所研究的单搭胶接结构,CFRP 复合材料层合板厚度为 3.6 mm,搭接长度为 L 。首先利用水刀分别切制尺

寸为 120 mm×25 mm×3.6 mm 的 CFRP 复合材料层合板被连接件,其次对切制好的层合板胶接区域进行表面处理,并制作 $L\times 25$ mm 的 LJM-170 型中温固化环氧树脂基胶膜,最后利用 HOC-ZH60A 真空烘箱对单搭胶接结构试验件进行加热固化,固化温度为 120℃,固化时间为 90 min,胶膜固化厚度为 0.12 mm。试验件几何尺寸如图 1(a)所示。表 1 为 LJM-170 胶膜的材料参数,表 2 为 T300/7901 CFRP 复合材料层合板的材料参数。

表 1 LJM-170 胶膜的材料参数

Table 1 Mechanical properties of LJM-170 adhesive film	
Property	Value
E/MPa	3400
G/MPa	3400
σ/MPa	31.5
τ/MPa	36.5
$G_n^C/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.9
$G_s^C, G_t^C/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.0

Notes: E, G —Elastic moduli in tension and shear; σ, τ —Failure strengths in tension and shear; G_n^C —Toughness in tension; G_s^C, G_t^C —Toughness in shear.

表 2 T300/7901 碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料层合板的材料参数

Table 2 Mechanical properties of T300/7901 carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite laminate			
Property	Value	Property	Value
E_{11}/MPa	125000	$K_n/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	100000
$E_{22}, E_{33}/\text{MPa}$	11300	$K_s/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	100000
$G_{12}, G_{13}/\text{MPa}$	5430	σ/MPa	28.5
G_{23}/MPa	3980	τ/MPa	35.5
ν_{12}, ν_{13}	0.30	$G_n^C/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.34
ν_{23}	0.42	$G_s^C, G_t^C/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.38
X_t/MPa	2000		
X_c/MPa	1100		
Y_t/MPa	80		
Y_c/MPa	280		
S/MPa	120		

Notes: E_{ii} ($i=1, 2, 3$)—Young's modulus in the i direction; G_{ij} ($i=1, 2, 3$)—Shear modulus in the $i-j$ plane; ν_{ij} ($i=1, 2, 3$)—Poisson's ratio in the $i-j$ plane; X_t, X_c and Y_t, Y_c —Tensile and compressive strengths in the 1 and 2 directions; S —Shear strength; K_n, K_s —Stiffness components in tension and shear; σ, τ —Failure strengths in tension and shear.

1.2 试验方法

图 1 为 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构及

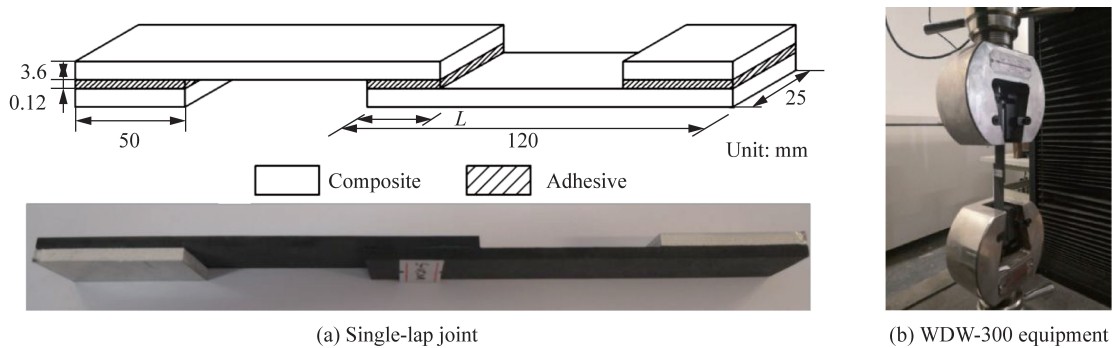


图 1 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构及 WDW-300 型万能拉伸试验机

Fig. 1 Adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates and WDW-300 universal tensile test machine

长春科新试验仪器有限公司生产的 WDW-300 型万能拉伸试验机。在进行拉伸试验时, 将单搭接胶接结构试验件的两端夹持在拉伸试验机上, 下端完全固定, 上端施加纵向位移载荷, 并通过应变引伸仪记录试验件上的位移变化。表 3 为两个试验方案, 方案 1 是研究搭接长度对单搭接胶接结构的影响, 方案 2 是研究铺层方式对单搭接胶接结构的影响, 其中 A、B 和 C 分别代表三种铺层。

2 复合材料非线性渐进损伤模型

2.1 CFRP 层合板层间与胶层损伤模型

基于内聚力(Cohesive)单元的双线性本构模型建立层间和胶层损伤模型, 其中 CFRP 复合材料层合板中层间 Cohesive 单元为零厚度, 而胶层中的 Cohesive 单元的厚度为 0.12 mm, 基于力-分离位移准则和 B-K 断裂准则对层间和胶层单元建立连续损伤机制^[12]。

图 2 为 Cohesive 单元的双线性本构模型, 层间和胶层单元未发生失效时, 不同方向的本构关系为线性关系, 刚度分别为 K_{nn} 、 K_{ss} 和 K_{tt} 。

层间和胶层中的 Cohesive 单元采用二次名义应力准则来判断损伤起始^[12]:

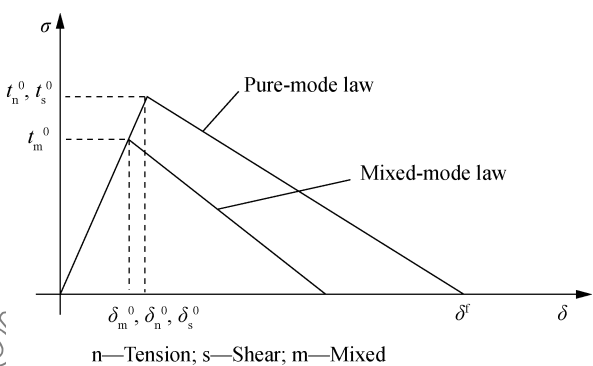


图 2 内聚力(Cohesive)单元的双线性本构模型

Fig. 2 Bilinear constitutive model of cohesive element

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \tag{1}$$

式中: t_n^0 为层间和胶层单元的法向强度; t_s^0 和 t_t^0 为剪切强度。当等式成立时, Cohesive 单元开始失效。当 Cohesive 单元开始发生损伤后, 其本构关系为

$$t = (1 - D) \text{diag}(K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}) \delta \tag{2}$$

式中: D 为损伤系数, 其取值范围为 $[0, 1]$, $D=0$ 时, 表示材料未失效; $D=1$ 时, 表示材料完全失效。材料的刚度退化过程和最终失效位移由单元的临界应变能释放率 G^C 来控制, 其中 G^C 为图 2 中力-分离位移曲线下的面积。

表 3 T300/7901 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构试验件

Table 3 Specimens for adhesively bonded single-lap joints of T300/7901 CFRP composite laminates

Experiment	Label	Lap length/mm	Specimen numbers	Stacking sequence
1	A-SLJ-5	5	4	[45/0/-45/90] _{3s}
	A-SLJ-10	10	4	[45/0/-45/90] _{3s}
	A-SLJ-15	15	4	[45/0/-45/90] _{3s}
	A-SLJ-20	20	4	[45/0/-45/90] _{3s}
2	A-SLJ-10	10	4	[45/0/-45/90] _{3s}
	B-SLJ-10	10	4	[90/45/-45/0] _{3s}
	C-SLJ-10	10	4	[0 ₃ /90 ₃] _{2s}

Notes: A, B and C—Stacking sequences; SLJ—Single-lap joint.

层间和胶层中 Cohesive 单元的失效过程由 B-K 断裂准则来计算:

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left(\frac{G_S}{G_T} \right)^\eta \quad (3)$$

式中: $G_S = G_s + G_t$; $G_T = G_n + G_s$; G_n^C 、 G_s^C 和 G_t^C 分别为法向和两个剪切方向临界断裂能; η 与材料参数有关, 当材料为碳纤维增强环氧树脂复合材料时, $\eta=1\sim 2$, 本文取 $\eta=1.45$ 。

2.2 CFRP 层合板层内渐进损伤模型

本文采用三维 Hashin 失效准则^[26], 表达式如下:

$$e_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (4)$$

纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$):

$$e_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c} \right)^2 \quad (5)$$

基体拉伸失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$):

$$e_{mt} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_t^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (6)$$

基体压缩失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$e_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{1}{2S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (7)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{22} 和 σ_{33} 为正应力; τ_{12} 、 τ_{13} 和 τ_{23} 为剪切应力; X_t 、 X_c 、 Y_t 、 Y_c 分别为单层板的纵向和横向的拉伸强度和压缩强度; S_{12} 、 S_{13} 和 S_{23} 分别为纵向和两个横向剪切强度。

采用连续损伤变量描述材料损伤, 并建立 CFRP 复合材料层合板的三维材料损伤本构关系^[4]:

$$\sigma = C_d \epsilon \quad (8)$$

式中: σ 和 ϵ 分别为应力和应变; C_d 为刚度矩阵, 与损伤状态有关。

本文引入连续损伤变量 d_i , 下标 i 为 ft、fc、mt 和 mc, 其中 d_{ft} 、 d_{fc} 、 d_{mt} 和 d_{mc} 分别为纤维和基体的拉伸和压缩连续损伤变量, 其取值范围为 $[0, 1]$, 当 $d_i = 0$ 时, 表示没有损伤, 当 $d_i = 1$ 时, 表示完全失效。使用四个连续损伤变量定义损伤因子, 对于纤维失效用 d_f 表示, 对于基体失效用 d_m 表示。当材料点发生失效时, 其刚度矩阵折减。本文使用指数型的连续损伤变量来定义损伤演化过程, 表达式如下^[4]:

$$d_{ft} = 1 - \left(\frac{1}{e_{ft}} \right) e^{(-C_{11} \epsilon_{11}^{ft} (e_{ft}^{-1}) L_c / G_{ft})} \quad (9)$$

$$d_{fc} = 1 - \left(\frac{1}{e_{fc}} \right) e^{(-C_{11} \epsilon_{11}^{fc} (e_{fc}^{-1}) L_c / G_{fc})} \quad (10)$$

$$d_{mt} = 1 - \left(\frac{1}{e_{mt}} \right) e^{(-C_{22} \epsilon_{22}^{mt} (e_{mt}^{-1}) L_c / G_{mt})} \quad (11)$$

$$d_{mc} = 1 - \left(\frac{1}{e_{mc}} \right) e^{(-C_{22} \epsilon_{22}^{mc} (e_{mc}^{-1}) L_c / G_{mc})} \quad (12)$$

式中: G_{ft} 、 G_{fc} 、 G_{mt} 和 G_{mc} 为材料的四种失效形式下的临界断裂能; L_c 为特征长度。

2.3 CFRP 层合板有限元模型

基于 CFRP 复合材料层合板面内损伤模型及层间和胶层损伤模型, 在 ABAQUS 有限元分析软件上建立单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的 CFRP 复合材料层合板三维有限元模型, 并通过用户材料子程序 VUMAT 来实现。边界条件为接头的一端完全固定, 另一端施加沿胶接结构轴向方向的位移载荷。图 3 为 CFRP 复合材料层合板单搭和双搭胶接结构的三维有限元模型, 胶层采用 COH3D8 单元进行网格划分, 层合板采用 C3D8R 单元, 层间采用 COH3D8 单元, 且插入到邻近胶层的两铺层之间。为了节约计算成本, 仅对胶接区域进行网格细化, 网格大小为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。

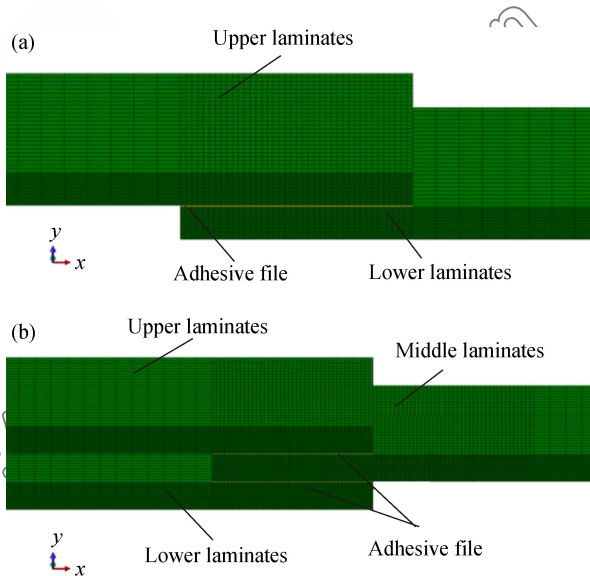


图 3 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构(a)及双搭胶接结构(b)有限元模型

Fig. 3 Finite element model of adhesively bonded single-lap(a) and double-lap(b) joints of CFRP composite laminates

3 结果与讨论

3.1 胶接参数对 CFRP 层合板连接性能的影响

3.1.1 搭接长度对 CFRP 层合板连接性能的影响

为了研究搭接长度对胶接结构的极限失效载荷

及搭接剪切强度的影响, 对采用 4 种搭接长度的试样进行试验及数值模拟分析。已知胶接结构的搭接剪切强度的表达式为

$$\tau_L = U_L / (LB) \tag{13}$$

式中: τ_L 为搭接剪切强度; U_L 为极限失效载荷; L 为搭接长度; B 为搭接宽度。

为了更好地描述胶接结构的失效形式, 本文引入失效程度 F , 表达式如下:

$$F_{exp} = S_{exp} / (LB) \tag{14}$$

$$F_{sim} = S_{sim} / (LB) \tag{15}$$

式中: F_{exp} 和 F_{sim} 分别为胶接结构试验和数值的失效程度; S_{exp} 和 S_{sim} 分别为胶接结构试验和数值的失效面积。

图 4 为采用铺层 A 的不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的极限失效载荷试验和数值结果。可知, 试验结果的离散度均低于 6%, 模拟结果与试验结果的相对误差小于 5.1%, 验证了所采用的数值模拟方法的有效性。

图 5 为搭接长度 $L=20\text{ mm}$ 的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的载荷-位移曲线。可知, 数值模拟与试验所得的载荷-位移曲线变化趋势一致, 但数值模拟的极限失效载荷值比试验值高 0.34 kN, 原因是由于试验件在制备过程中存在胶层分布不均匀, 结构内部含有裂纹等缺陷, 且随着 L 的增大缺陷增多, 从而造成试验结果的离散度逐渐增大。

图 6 是不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的极限失效载荷变化曲线。可知, 试验值与模拟值的相对误差随着 L 的增大逐渐增大, 验证了胶接区域增大而造成胶接区域内部缺陷增多

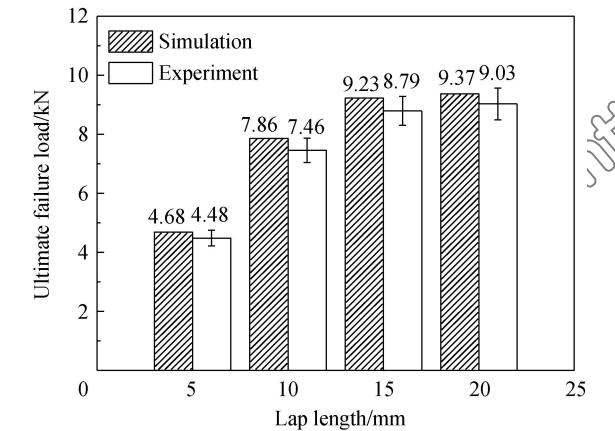


图 4 不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的极限失效载荷

Fig. 4 Ultimate failure load of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

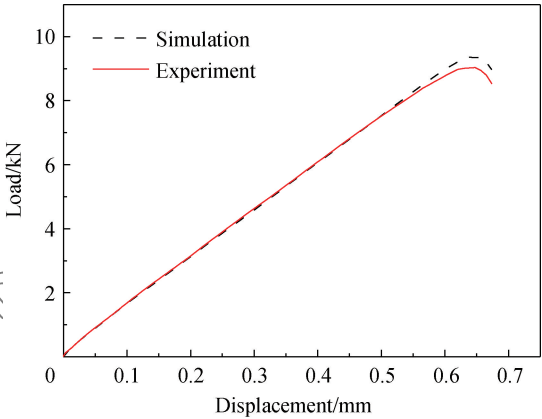


图 5 搭接长度 $L=20\text{ mm}$ 的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with lap lengths $L=20\text{ mm}$

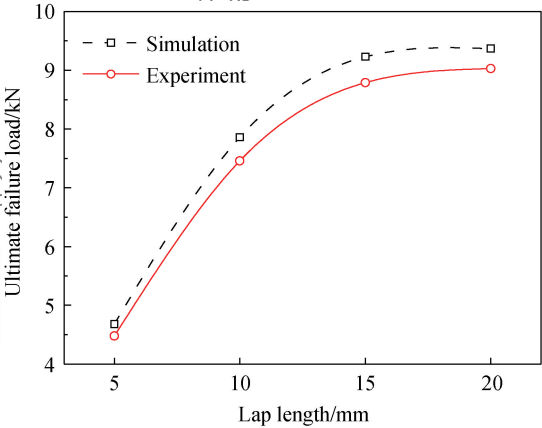


图 6 不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的极限失效载荷变化曲线

Fig. 6 Ultimate failure load of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

是引起误差增大的原因, 且当 L 增大到 15 mm 时, 极限失效载荷逐渐趋于稳定值, 因此在工程应用上, 为了节约成本, 应合理选择搭接长度。

图 7 和图 8 分别为不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构和双搭胶接结构的极限失效载荷和搭接剪切强度变化曲线。可知, 搭接长度与极限失效载荷呈非线性关系, 随着 L 的增大, 极限失效载荷逐渐增大, 当 L 大于 15 mm 时, 极限失效载荷趋于稳定值, 且相较而言, 双搭胶接结构的极限失效载荷比单搭胶接结构上升幅度大, 原因是由于单搭胶接结构在施加单向拉伸过程中受到载荷偏心的影响, 而双搭胶接结构的对称性则明显减小了载荷偏心作用的影响。

对于搭接剪切强度, 双搭胶接结构下降幅度则

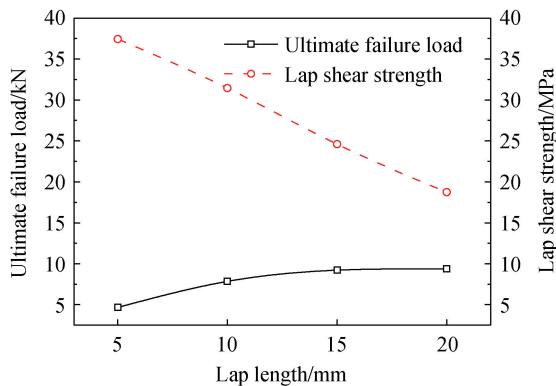


图 7 不同搭接长度 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的极限失效载荷和搭接剪切强度变化曲线
Fig. 7 Ultimate failure load and lap shear strength curves of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

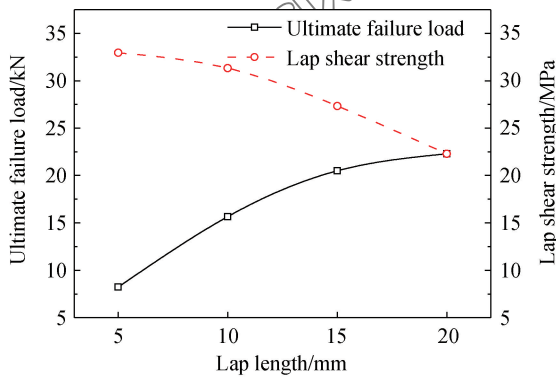


图 8 不同搭接长度 CFRP 复合材料层合板双搭胶接结构的极限失效载荷和搭接剪切强度变化曲线
Fig. 8 Ultimate failure load and lap shear strength curves of adhesively bonded double-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

较小；当 L 在 5~10 mm 变化时，与单搭胶接结构相比，双搭胶接结构的搭接剪切强度下降幅度为 11.97%；而当 L 在 10~20 mm 变化时，双搭胶接结构的搭接剪切强度上升幅度为 43.21%。因此，双搭胶接结构的连接性能较好。

图 9(a) 为搭接长度 $L=20$ mm 的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的主要失效形式。可知，红色区域外部是胶层自身剪切失效，失效程度为 69.44%；红色区域内部是被连接件邻近胶层的层间沿 45° 方向分层失效，失效程度为 30.56%。

图 9(b) 为搭接长度 $L=10$ mm 的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的主要失效形式。可知，红色区域外部是胶层自身剪切失效，失效程度为 97.58%；红色区域内部是被连接件邻近胶层的层

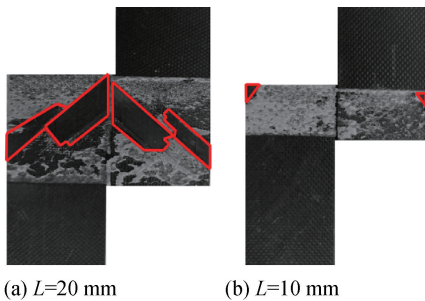


图 9 不同搭接长度 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的失效形式
Fig. 9 Failure modes of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

间沿 45° 方向分层失效，但失效程度只有 2.42%。当 L 在 5~20 mm 变化时，随着 L 的增大，胶层自身剪切失效程度逐渐减小，而被连接件邻近胶层的层间分层失效程度逐渐增大，失效形式逐渐由胶层自身剪切失效过渡到邻近胶层的层合板层间分层失效。

图 10 和图 11 分别为不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构和双搭胶接结构的数值模拟结果，失效形式主要是胶层失效和层合板分层失效，红色代表失效，蓝色代表完好。由图 10(a) 可知，搭接长度分别为 10 mm 和 20 mm 的胶层失效程度分别为 97.85% 和 76.5%。由图 10(b) 可知，搭接长度分别为 10 mm 和 20 mm 邻近胶层的层间失效程度分别为 2.15% 和 23.90%。数值模拟与试验结果相比，层间失效程度较小，原因是 CFRP 复合材料层合板内部裂纹等缺陷引起层间分层失效。由图 11 可知，与单搭胶接结构的失效形式一致，随着 L 的增大，双搭的胶层失效程度逐渐减小，层合板分层失效程度逐渐增大。

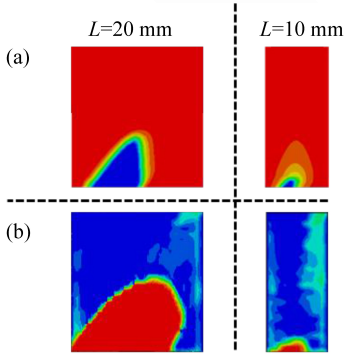


图 10 不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭胶接结构的胶层剪切失效(a)及被连接件邻近胶层的层间分层失效(b)
Fig. 10 Shear failure within adhesive film(a) and delamination within laminates adjacent to adhesive film(b) of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

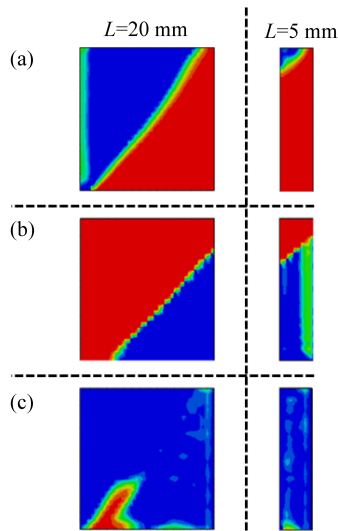


图 11 不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板双搭接胶接结构的胶层剪切失效(a)及被连接件邻近胶层的层间分层失效(b)，(c)
Fig. 11 Shear failure within adhesive film(a) and delamination within laminates adjacent to adhesive film(b)，(c) of adhesively bonded double-lap joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

3.1.2 被连接件铺层方式对 CFRP 层合板连接性能的影响

为了研究被连接件铺层方式对胶接结构连接性能的影响，选择搭接长度 $L=10\text{ mm}$ 的胶接结构。

图 12 为采用不同铺层方式的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的极限失效载荷试验和数值结果。可以看出，试验结果的离散度均在 5.8% 以下，且模拟结果和试验结果的相对误差小于 6%，进一步验证了所采用的数值模拟方法的有效性。

图 13 和图 14 分别为不同铺层方式的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的极限

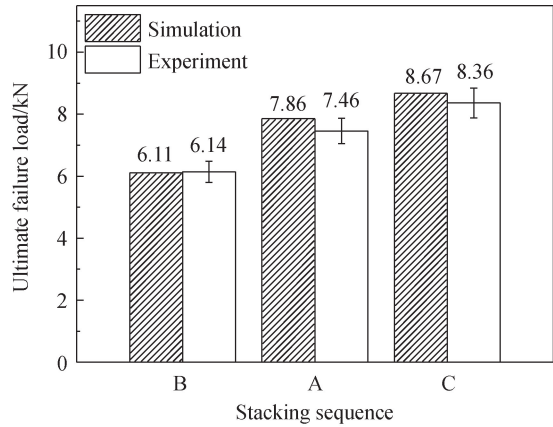


图 12 不同铺层方式的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的极限失效载荷
Fig. 12 Ultimate failure load of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different stacking sequences

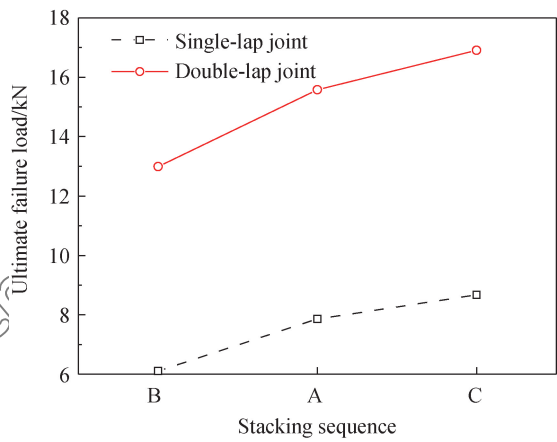


图 13 不同铺层方式的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的极限失效载荷变化曲线
Fig. 13 Ultimate failure load curves of adhesively bonded single-lap and double-lap joints of CFRP composite laminates with different stacking sequences

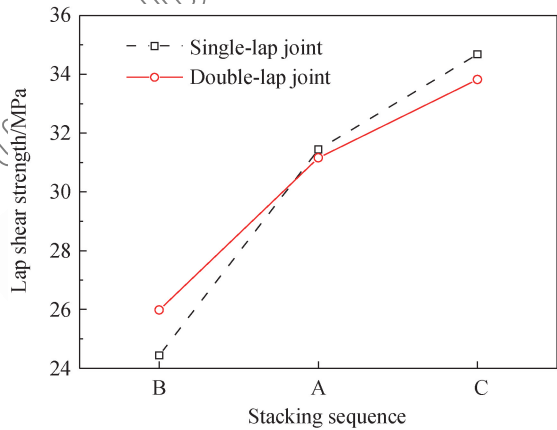


图 14 不同铺层方式的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的搭接剪切强度变化曲线
Fig. 14 Lap shear strength curves of adhesively bonded single-lap and double-lap joints of CFRP composite laminates with different stacking sequences

失效载荷变化和搭接剪切强度变化曲线。可见，单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的极限失效载荷-铺层方式曲线变化趋势一致，采用铺层 C 胶接结构的极限失效载荷最大，原因是 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 0° ，层合板能承受较大的拉伸载荷；采用铺层 B 胶接结构的极限失效载荷最小，原因是 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 90° ，层合板承受较小的拉伸载荷；与单搭接胶接结构的极限失效载荷相比，采用铺层 B、A 和 C 的双搭接胶接结构分别增大了 6.88 kN、8.02 kN 和 8.24 kN。

对于搭接剪切强度，单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的曲线变化趋势一致，采用铺层 C 胶接结构的

搭接剪切强度最大，原因是 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 0°，胶层能承受较大的剪切应力；采用铺层 B 胶接结构的搭接剪切强度最小，原因是 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 90°，胶层能承受较小的剪切应力；与双搭接胶接结构的搭接剪切强度相比，采用铺层 B 的单搭接胶接结构减小了 1.54 MPa，采用铺层 A 和铺层 C 的单搭接胶接结构分别增大了 0.28 MPa 和 0.86 MPa。因此与铺层 A 和铺层 B 的胶接结构相比，采用铺层 C 的胶接结构连接性能较好。

图 15(a)为采用铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的失效形式。可知，红色区域外部是胶层自身剪切失效，失效程度为 91.6%；红色区域内部是胶层与被连接件界面失效，失效程度为 8.4%；被连接件邻近胶层的层间未发生失效。

图 15(b)为采用铺层 B 的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的失效形式。可知，红色区域外部是胶层自身剪切失效，失效程度为 55.04%；红色区域内部是被连接件邻近胶层的层间沿 90°方向分层失效，失效程度为 44.96%。因此与铺层 B 相比，采用铺层 C 胶接结构的胶层剪切失效程度较大，层间失效程度较小，原因是采用铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 0°，层合板能承受较大的拉伸载荷，层间不易发生分层失效，而采用铺层 B 的 CFRP 复合材料层合板邻近胶层的铺层纤维方向为 90°，层合板不能承受较大的拉伸载荷，层间易发生分层失效。

图 16 为铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的数值模拟结果。可见，失效形式与试验结果基本吻合，主要是胶层失效和层合板分层失效。图 16(a)为胶层剪切失效，失效程度为 100%。图 16(b)为被连接件邻近胶层的层间分层失效，失效程度为 0。图 17(a)、图 17(b)和图 17(c)分别为

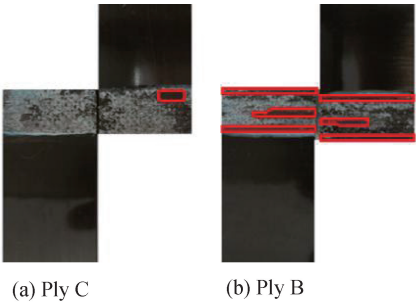


图 15 不同铺层方式 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构的失效形式
Fig. 15 Failure modes of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with different stacking sequences

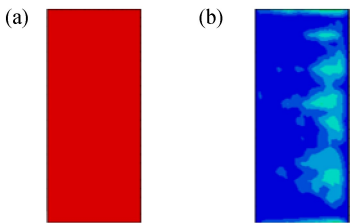


图 16 铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构胶层自身剪切失效(a)及被连接件邻近胶层的层间分层失效(b)
Fig. 16 Shear failure within adhesive film(a) and delamination within laminates adjacent to adhesive film(b) of adhesively bonded single-lap joints of CFRP composite laminates with stacking sequence of ply C

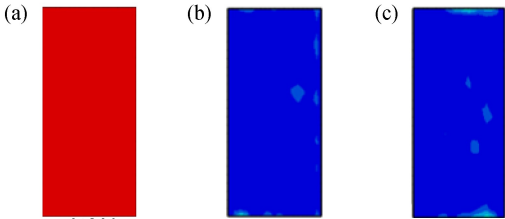


图 17 铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板双搭接胶接结构的胶层剪切失效(a)及被连接件邻近胶层的层间分层失效((b),(c))
Fig. 17 Shear failure within adhesive film(a) and delamination within laminates adjacent to adhesive film((b),(c)) of adhesively bonded double-lap joints of CFRP composite laminates with stacking sequence of ply C

采用铺层 C 的 CFRP 复合材料层合板双搭接胶接结构的胶层剪切失效、中间被连接件邻近胶层的层间分层失效和上下被连接件邻近胶层的层间分层失效。可知，与单搭接胶接结构的失效形式一致，铺层 B 和铺层 C 的双搭接胶接结构主要失效形式分别为层合板分层失效和胶层失效。

3.2 搭接长度的优化

当搭接长度 L 在 5~20 mm 变化时，极限失效载荷 U_L 随着 L 的增大逐渐增大，搭接剪切强度 τ_L 随着 L 的增大逐渐减小，基于下面两个重要的假设对搭接长度进行优化：(1)胶接结构的胶层剪切失效程度决定结构的搭接剪切强度；(2)胶接结构邻近胶层的层合板层间分层失效程度决定结构的拉伸强度。

拉伸强度和搭接剪切强度是胶接结构连接强度 S 的重要指标，拉伸强度 $\sigma_L = U_L / (Bh)$ ，考虑到 σ_L 和 τ_L 两个指标的影响，引入 α 和 β 两个影响因子，得到连接强度 S 的计算公式为

$$S = \alpha \sigma_L + \beta \tau_L \tag{16}$$

式中， α 和 β 是通过数值模拟得到的层间和胶层的失效程度来获得， α 为邻近胶层的层间分层失效程

度的权重; β 为胶层自身剪切失效程度的权重, $\alpha + \beta = 1$ 。表 4 为不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的 α 和 β 值, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

表 4 不同搭接长度的 CFRP 复合材料层合板胶接结构的 α 和 β 值

Table 4 α and β values of adhesively bonded joints of CFRP composite laminates with different lap lengths

Lap type	Lap length/mm	α	β	σ_L /MPa	τ_L /MPa
SLJ	5	0	1.0000	52.00	37.44
	10	0.0215	0.9785	87.33	31.44
	15	0.2315	0.7685	102.56	24.61
	20	0.2350	0.7650	104.11	18.74
DLJ	5	0.2619	0.7381	91.56	32.96
	10	0.4877	0.5123	174.00	31.32
	15	0.6896	0.3104	227.78	27.33
	20	0.7450	0.2540	247.78	22.29

Notes: SLJ—Single-lap joint; DLJ—Double-lap joint; α —Failure degree of delamination within laminates adjacent to adhesive film; β —Shear failure degree of adhesive film; σ_L —Strength of tension; τ_L —Lap shear strength.

基于最小二乘法对搭接长度 L 和其对应的连接强度 S 进行多项式拟合:

$$S_s = -15.29549L + 1.38106L^2 - 0.03646L^3 + 83.94818 \quad (17)$$

$$S_D = -12.07921L + 2.31186L^2 - 0.06902L^3 + 59.53488 \quad (18)$$

式中: S_s 为单搭接胶接结构的连接强度; S_D 为双搭接胶接结构的连接强度。

图 18 为 CFRP 复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的仿真数据点与拟合曲线。

根据式(17), 单搭接胶接结构的搭接长度 L 在 5~20 mm 变化时的最优解为 17 mm, 与搭接长度 20 mm 相比, 连接强度提高了 13.26%; 根据式(18), 双搭接胶接结构的搭接长度 L 在 5~20 mm 变化时的最优解为 19.3 mm, 与搭接长度 20 mm

相比, 连接强度提高了 0.43%。

4 结 论

通过对不同搭接长度和铺层方式的 T300/7901 碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料层合板单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的单轴拉伸试验和数值模拟, 得到如下结论。

(1) CFRP 复合材料层合板胶接结构的失效形式与搭接长度和铺层方式有关, 不同的搭接长度和铺层方式反映不同的失效形式。随着搭接长度 L 的增大, 单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的胶层剪切失效程度逐渐减小, 而被连接件邻近胶层的层间分层失效程度逐渐增大。

(2) 胶接结构的极限失效载荷随着搭接长度 L 的增大而增大, 并趋于稳定值; 搭接剪切强度随着 L 的增大而减小。当 L 在 5~20 mm 变化时, 与单搭接胶接结构相比, 双搭接胶接结构的连接性能较好。与铺层 $[45/0/-45/90]_{3S}$ 和 $[90/45/-45/0]_{3S}$ 相比, 采用铺层 $[0_3/90_3]_{2S}$ 胶接结构的极限失效载荷和搭接剪切强度最大, 连接性能最好。

(3) 当搭接长度 L 在 5~20 mm 变化时, 通过对搭接长度进行优化, 得到单搭接胶接结构的最优解为 17 mm, 双搭接胶接结构的最优解为 19.3 mm, 与搭接长度 20 mm 相比, 单搭接胶接结构和双搭接胶接结构的连接强度分别提高了 13.26% 和 0.43%。

参考文献:

[1] 李振凯, 余音, 汪海. 复合材料层合板双面贴补结构渐进损伤分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 877-882.
LI Z K, YU Y, WANG H. Progressive damage analysis of

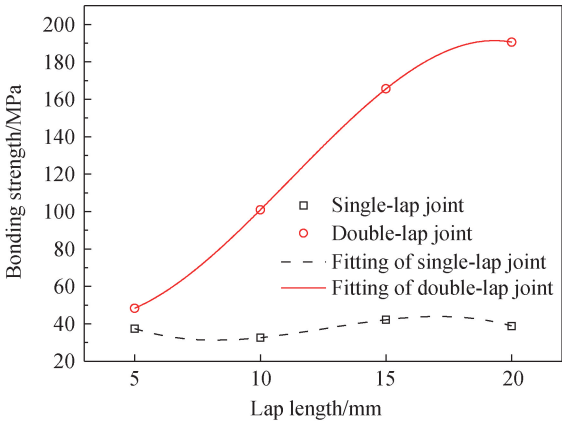


图 18 CFRP 复合材料层合板胶接结构连接强度与搭接长度之间的拟合曲线
Fig. 18 Fitting curves between bonding strength and lap length of adhesively bonded joints of CFRP composite laminates

- double-sided adhesively bonding repaired structures of composite laminates[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(6): 877-882 (in Chinese).
- [2] 苗学周, 李成, 铁瑛, 等. 补片形状和尺寸对复合材料胶接修补的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 63-69.
- MIAO X Z, LI C, TIE Y, et al. Influence of patch shape and size on adhesively bonded composite repair[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 63-69 (in Chinese).
- [3] LINDE P, PLEITNER J. Modelling and simulation of fibre metal laminates[C]//ABAQUS Users' Conference. Boston: [s. n.], 2004: 421-439.
- [4] 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.
- [5] 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 A H, LI Y, HUAN D J, 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 (in Chinese).
- [6] ZHAO L B, WANG Y N, QIN T L, et al. A new material model for 2D FE analysis of adhesively bonded composite joints[J]. Materials Science, 2014, 20(4): 468-473.
- [7] RIBEIRO T E A, CAMPILHO R D S G, DA-SILVA L F M, et al. Damage analysis of composite aluminium adhesively bonded single-lap joints[J]. Composite Structures, 2016, 13: 25-33.
- [8] 郭凯特, 谢宗燕, 李想, 等. 复合材料双面贴补修理拉伸解析分析模型及试验验证[J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2194-2204.
- GUO K T, XIE Z H, LI X, et al. An analytical model and its validation for a composite double lap joints under unidirectional tension[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 2194-2204 (in Chinese).
- [9] 吕胜利, 程起有, 姚磊江, 等. 损伤复合材料层板胶接修理的优化设计[J]. 机械强度, 2007, 29(4): 598-600.
- LV S L, CHENG Q Y, YAO L J, et al. Optimization design of adhesive bonding repair of damaged composite laminates[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(4): 598-600 (in Chinese).
- [10] 郭霞, 关志东, 刘遂, 等. 搭接长度对复合材料单搭接胶接接头的影响[J]. 科技导报, 2013, 31(7): 37-41.
- GUO X, GUAN Z D, LIU S, et al. Effect of lap length on the adhesive-bonded single-lap composite joints[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7): 37-41 (in Chinese).
- [11] 刘魏光, 余音, 汪海. 考虑剪切非线性复合材料渐进损伤模型[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(2): 194-199.
- LIU W G, YU Y, WANG H. A damage model considering shear nonlinearity for progressive failure analysis of composite laminates[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(2): 194-199 (in Chinese).
- [12] 梁祖典, 燕瑛, 张涛涛, 等. 复合材料单搭接胶接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 Z D, YAN Y, ZHANG T T, 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).
- [13] LI J F, YAN Y, ZHANG T T, et al. Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 57: 95-104.
- [14] SULU I Y. Mechanical behavior of single-lap and double-lap adhesive joined composite parts[J]. Mechanical Testing Numerical Simulation, 2017, 59: 11-12.
- [15] 王天宇, 段跃新, 向经纬, 等. 铺层顺序对预成型体搭接复合材料拉伸性能影响的仿真与验证[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2745-2752.
- WANG T Y, DUAN Y X, XIANG J W, et al. Simulation analysis and verification of the effect of stacking sequence on tensile properties of preform laminated composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 2745-2752 (in Chinese).
- [16] GUO X, GUAN Z D, NIE H C, et al. Damage tolerance analysis of adhesively bonded composite single lap joints containing a debond flaw[J]. The Journal of Adhesion, 2016, 93(3): 216-234.
- [17] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 损伤复合材料层板胶接修理试验研究[J]. 机械强度, 2003, 25(3): 260-263.
- YAO L J, TONG X Y, LV S L. Experimental study on the adhesive bonding repair of damaged composite laminates[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(3): 260-263 (in Chinese).
- [18] 孙振辉, 铁瑛, 侯玉亮, 等. 相对冲击位置和补片层数对胶接修理CFRP层合板抗冲击性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1114-1123.
- SUN Z H, TIE Y, HOU Y L, et al. Effect of relative impact

- location and patch layer number on impact resistance of adhesive repaired CFRP laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5): 1114-1123 (in Chinese).
- [19] 刘斌, 徐绯, 司源, 等. 飞机复合材料斜胶接修补结构的冲击损伤[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2698-2705.
- LIU B, XU F, SI Y, et al. Impact damage of composite scarf bonded repair structure for aircraft[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2698-2705 (in Chinese).
- [20] 邓雅琼, 陈洋, 栗娜, 等. 三维编织复合材料与金属胶接结构的力学性能与优化[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2760-2767.
- DENG Y Q, CHEN Y, LI N, et al. Mechanical properties and optimization adhesive structure of three-dimensional braided composites and metal[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2760-2767 (in Chinese).
- [21] CAMPILHO R D S G, BANE A M D, PINTO A M G, et al. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, 31(5): 363-372.
- [22] SULU I Y. Mechanical behavior of composite parts adhesively jointed with the insert double-lap joint under tensile load [J]. *Welding in the World*, 2018, 62(2): 403-413.
- [23] BUDHE S, BANE A 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.
- [24] TIE Y, HOU Y L, LI C. An insight into the low-velocity impact behavior of patch-repaired CFRP laminates using the numerical and experimental approaches[J]. *Composite Structures*, 2018, 190: 179-188.
- [25] YE J X, YAN Y, LI T, et al. 3D explicit finite element analysis of tensile failure behavior in adhesive-bonded composite single-lap joints [J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 261-275.
- [26] HOU Y L, TIE Y, LI C, et al. Low-velocity impact behaviors of repaired CFRP laminates: Effect of impact location and external patch configurations[J]. *Composites Part B*, 2019, 163: 669-680.