DOI: 10.3901/JME.2021.08.154

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*

胡春幸 侯玉亮 铁 瑛 李 成 毛振刚
(郑州大学机械与动力工程学院 郑州 450001)

摘要: 对于碳纤维增强基复合材料(Carbon fibre-reinforced polymer, CFRP)层合板单搭胶接结构的优化问题, 首先利用连续损伤力学模型、三维 Hashin 准则和内聚力模型研究不同胶接参数对 CFRP 层压板单搭胶接结构力学性能的影响, 其次采用拉丁超立方试验设计方法和响应面法构建了拉伸强度代理模型, 最后基于遗传算法和代理模型进行联合优化。结果表明, 仿真与试验吻合较好, 数值结果与试验结果的误差均低于 10%, 验证了有限元模型的精确性。随着搭接长度的增大, 拉伸强度和层合板层间分层损伤程度逐渐增大, 剪切强度和胶层自身剪切失效程度逐渐减小; 胶接结构的力学性能及失效形式随着铺层方式的不同而改变。最佳铺层顺序、胶接长度、胶层厚度和搭接宽度分别为 $[0_3/90_3]_{2s}$ 、20 mm、0.060 7 mm 和 10 mm。与常规单搭胶接结构相比, 拉伸强度和剪切强度分别提高了 25.92%和 25.88%。采用遗传算法对 CFRP 层合板单搭胶接结构进行优化, 对提高单搭胶接接头的力学性能具有重要意义。

关键词: 单搭胶接结构; 胶接参数; 连接强度; 代理模型; 优化设计

中图分类号: TB332

Influence of Different Bonding Parameters on the Strength of CFRP Laminates with Single Lap Bonding Structure and Optimization

HU Chunxing HOU Yuliang TIE Ying LI Cheng MAO Zhengang
(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract: To obtain the optimization of single lap joint(SLJ) of CFRP laminates, the effects of different bonding parameters on the mechanical properties of SLJ are firstly studied by using continuum damage mechanics(CDM) model, 3D Hashin damage criterion and cohesion zone model(CZM). Moreover, a surrogate model of tensile strength is constructed using the Latin hypercube sampling (LHS) method and response surface method(RSM). Finally, the optimized design of CFRP SLJ structure is obtained by combination of the surrogate model and genetic algorithm(GA). The results show that, the error is less than 10% between the numerical and experimental results, which proves the validity of the used numerical model. As the lap length increases, the tensile strength and the delamination damage between adjacent layers of the laminates are gradually increased. Additionally, the shear strength and the shear failure level of the adhesive are gradually reduced. The connection performance and failure form of the adhesively bonded structure change with different stacking sequences. The best stacking sequences, lap lengths, adhesive thickness and lap widths are $[0_3/90_3]_{2s}$, 20 mm, 0.060 7 mm, and 10 mm, respectively. Compared with the conventional SLJ, the tensile and shear strengths are increased by 25.92% and 25.88%, respectively. Genetic algorithm is used to optimize the SLJ of CFRP laminates, which is of great significance to improve the mechanical properties of SLJ.

Key words: single-lap joints; adhesively bonding parameters; connection strength; surrogate model; optimization

0 前言

胶接结构与传统机械连接相比, 单搭胶接结构

因具有结构重量轻、工艺性好、连接效率高、应力均匀性好、减振及绝缘性能好等优点而被广泛应用。单搭胶接结构也是复合材料连接中最常见的类型之一, 因此许多科研人员对其进行了研究。

近年来, 复合材料和胶黏剂的连续损伤力学模型和胶接结构的连接形式一直被国内外学者所研

* 国家自然科学基金(U1833116, 52005451)和河南省等学校重点科研(20A460003)资助项目。20200410 收到初稿, 20201014 收到修改稿

究,许多学者也比较和分析了不同损伤理论和胶接形式对胶接结构连接性能的影响^[1-4]。基于不同的失效准则,国内外学者建立了不同的结构模型,比较分析了不同胶接参数下胶接结构的连接性能与损伤行为^[5-10]。研究得出碳纤维增强基复合材料(Carbon fibre-reinforced polymer, CFRP)单搭接胶接结构的力学性能和损伤行为与搭接长度和铺层方式等因素相关^[11-16]。苗学周等^[17]基于三维渐进损伤理论建立了不同补片形状的复合材料修补模型,得出了合理的补片形状和放置位置,并验证了模型的正确性。段元欣等^[18]通过试验和数值模拟的方法,研究了基材厚度对胶层剥离应力的影响,发现当 CFRP 厚度增加时,剥离应力集中现象得到改善。侯文彬等^[19]对胶层内部有缺陷的单、双搭接结构进行了试验研究,分析了不同厚度、面积、形状和位置 4 种缺陷片对接头失效强度的影响。毛振刚等^[20]针对不同铺层方式和不同搭接长度进行拉伸试验,得到了最佳铺层方式和最佳搭接长度,使得连接强度得到明显提高。鲁大伟等^[21]针对优化时的“提前收敛”现象,采用改进的遗传算法求解了 CFRP 层压板的铺层方法,得到了最优铺层方法。SULU 等^[22]在拉伸载荷作用时,对插入式双胶接结构进行粘接力学行为的研究,得出了最优的胶接参数。CAMPILHO 等^[23]采用标准和扩展模拟方法对单搭和双搭胶接接头进行了强度预测,比较分析了两种模拟方法的优劣性,并对标准模拟方法提出了一些改进。SUN 等^[24]基于应变的三维 Hashin 失效准则,研究了不同胶接参数对极限失效载荷、应力分布和失效模式的影响。ERDAL 等^[25]通过解析表达式和模拟退火算法确定了层合板最大屈曲载荷能力的最优层合板铺层序列。MAHDI 等^[26]通过代理模型和进化算法得到复合材料层合板的整体刚度和屈曲载荷最大化的帕累托最优解。但是,针对复合材料单搭接胶接结构的胶接参数的优化研究很少,本文则基于遗传算法对 CFRP 层合板单搭接胶接结构胶接参数进行优化。

本文使用数值模拟的方法基于连续损伤力学模型、内聚力模型(Cohesion zone model, CZM)和三维 Hashin 失效准则对 CFRP 单搭接胶接结构进行研究。首先研究了不同搭接长度的失效载荷并与文献[20]对比,然后研究了搭接长度和宽度、胶层厚度以及铺层方式对单搭接胶接结构的连接性能和损伤行为的影响,最后基于多项式响应面代理模型,采用遗传算法对搭接长度、胶层厚度、被胶接件宽度和铺层方式进行了优化。

1 试验件几何模型及材料性能

本文采用 CFRP 层合板 T300/7901 和 LJM-170 型中温固化环氧树脂基胶膜来研究单搭接胶接结构的力学性能,如图 1 所示。该结构单块板的长度为 120 mm,宽为 W mm,胶接长度为 L mm,胶膜厚度为 T mm,层合板厚度为 3.6 mm,一共 24 层。表 1 为 CFRP 层合板 T300/7901 的材料参数^[20,28],表 2 为 LJM-170 胶膜的材料参数^[20]。为了研究搭接长度和宽度、铺层角度和胶层厚度对 CFRP 单搭接胶接结构极限载荷和连接性能的影响。将单搭接胶接结构数值模型的左侧完全固定,右侧在 x 方向施加载荷位移,并通过历史输出记录单搭接胶接结构的载荷位移曲线。为减小载荷偏心的影响,在单搭接胶接结构的两端采用铝板作为夹持件,尺寸为 40 mm× W mm×3.6 mm。

图 1 CFRP 层合板单搭接胶接结构示意图(mm)

表 1 CFRP 层合板 T300/7901 的材料参数

材料参数	数值
纵向弹性模量 E_{11} /GPa	125
横向、法向弹性模量 E_{22}, E_{33} /GPa	11.3
纵横、纵法切变模量 G_{12}, G_{13} /GPa	5.43
横法切变模量 G_{23} /GPa	3.98
纵横、纵法泊松比 ν_{12}, ν_{13}	0.3
横法泊松比 ν_{23}	0.42
纵向拉伸强度 X_t /MPa	2 000
纵向压缩强度 X_c /MPa	1 100
横向拉伸强度 Y_t /MPa	80
横向压缩强度 Y_c /MPa	280
剪切强度 S /MPa	120
拉伸、剪切刚度 K_n, K_s /(N/mm ³)	10^5
拉伸失效强度 σ /MPa	28.5
剪切失效强度 τ /MPa	35.5
法向临界断裂能 G_n^c /(N/mm)	0.34
切向临界断裂能 G_s^c, G_t^c /(N/mm)	0.38

表 2 LJM-170 胶层的材料参数

材料参数	数值
弹性模量 E/GPa	3.4
切变模量 G/GPa	3.4
拉伸失效强度 σ/MPa	31.5
剪切失效强度 τ/MPa	36.5
法向临界断裂能 $G_n^c/(\text{N/mm})$	0.9
切向临界断裂能 $G_s^c, G_t^c/(\text{N/mm})$	1.0

2 数值分析模型

2.1 面内损伤模型

有限元强度分析不仅要考虑损伤起始准则, 还要考虑损伤变化过程, 用来预测复合材料从损伤起始到完全破坏的失效积累过程。本文基于 Fortran 语言编写 VUMAT 子程序对 CFRP 层合板的面内渐进损伤失效进行预测, 实现三维 Hashin 准则^[15]的起始与演化, 三维 Hashin 准则包括四种损伤模式, 具体表达式如下。

纤维拉伸失效($\sigma_{11} \geq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

纤维压缩失效($\sigma_{11} \leq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

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

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_t^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

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

$$\frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{1}{2S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

式中, σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 τ_{12} 、 τ_{13} 和 τ_{23} 分别为正应力和切应力; X_t 和 X_c 分别为单层板的纵向拉伸与压缩强度; Y_t 和 Y_c 分别为单层板的横向拉伸与压缩强度; S_{12} 、 S_{13} 和 S_{23} 分别为纵向和两个横向剪切强度。当以上各式的值超过 1 时, 复合材料损伤开始。

另外, 本文采用基于连续损伤力学的损伤变量来描述复合材料材料损伤, CFRP 复合材料损伤本构方程表达式如下

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (5)$$

式中, σ 和 ε 分别为应力张量和应变张量; C_d 为与损伤变量有关的刚度矩阵。

本文引入连续损伤变量 d_{ft} 、 d_{fc} 、 d_{mt} 和 d_{mc} , 分别对应纤维拉伸, 纤维压缩, 基体拉伸和基体压缩四种损伤模式, 其范围为[0, 1], 当以上 4 种损伤变量的值达到 1 时, 复合材料完全丧失承载能力。当复合材料满足损伤起始条件时, 对复合材料刚度矩阵进行折减。连续损伤变量具体表达式如下^[27]

$$d_{ft} = 1 - (1/e_{ft}) \exp(-C_{11} \varepsilon_{11}^{ft} \varepsilon_{11}^{ft} (e_{ft} - 1) L_c / G_{ft}) \quad (6)$$

$$d_{fc} = 1 - (1/e_{fc}) \exp(-C_{11} \varepsilon_{11}^{fc} \varepsilon_{11}^{fc} (e_{fc} - 1) L_c / G_{fc}) \quad (7)$$

$$d_{mt} = 1 - (1/e_{mt}) \exp(-C_{22} \varepsilon_{22}^{mt} \varepsilon_{22}^{mt} (e_{mt} - 1) L_c / G_{mt}) \quad (8)$$

$$d_{mc} = 1 - (1/e_{mc}) \exp(-C_{22} \varepsilon_{22}^{mc} \varepsilon_{22}^{mc} (e_{mc} - 1) L_c / G_{mc}) \quad (9)$$

式中, G_{ft} 和 G_{fc} 为纤维在拉伸与压缩时失效形式的临界断裂能; G_{mt} 和 G_{mc} 为基体在拉伸与压缩时失效形式的临界断裂能, L_c 为特征长度。

2.2 CFRP 层间与胶层损伤模型

本文采用内聚力(cohesive)模型模拟层合板层间损伤和胶层失效, 式中, 胶层的厚度为变量。0 厚度的 cohesive 单元用以模拟复合材料板的分层起始和扩展, 有限厚度的 cohesive 单元用以模拟层间和胶层的黏接破坏, 由文献[24]试验可知, 层合板的层间分层失效主要发生在前两层, 故在前两层之间插入厚度为 0 的 cohesive 单元。图 2 为 cohesive 单元的双线性本构模型。当 cohesive 单元未发生损伤时, 本构关系为线性关系。

胶层和邻近胶层的 CFRP 层合板层间的损伤起始使用二次名义应力准则来预测^[27], 表达式如下

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (10)$$

式中, t_n^0 为 CFRP 层间和胶层在第三方向上的法向强度; t_s^0 和 t_t^0 为剪切强度。当 cohesive 单元未发生损伤时, 其线弹性本构关系为

$$t = \text{diag}(K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}) \delta \quad (11)$$

式中, K_{nn} 、 K_{ss} 和 K_{tt} 分别为法向拉伸, 面内剪切和面外剪切刚度, δ 为张开位移。当式(10)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

$$t = (1 - D) \text{diag}(K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}) \delta \quad (12)$$

式中, D 为损伤因子, 其范围为[0, 1]。当 $D=0$ 时, 表示材料未发生损伤; 当 $D=1$ 时, 表示材料的刚度已退化到零。用来表示材料在刚度退化和最终失效过程中所释放的能量, 当材料完全失效时, 达到临界值。

图2 cohesive 单元的双线性本构模型

内聚力单元的损伤及演化过程采用 B-K 准则的断裂能定律, 如下

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left(\frac{G_s + G_t}{G_n + G_s} \right)^\eta \quad (13)$$

式中, G_n^C 、 G_s^C 和 G_t^C 分别为法向、面内和面外剪切临界断裂能; η 为与复合材料有关的参数, 对于碳纤维环氧树脂复合材料, $\eta=1 \sim 2$, 在本文中, 取 $\eta=1.45$ 。

2.3 CFRP 层合板三维有限元模型

如图 3 所示的基于 ABAQUS 6.14 建立三维单搭胶接结构有限元模型, 与二维结构相比, 三维结构不仅可以模拟复杂模型, 还能有效地获得更大的胶层应力, 揭示胶层应力对该结构的影响。基于 CFRP 层合板层内失效模型及层合板层间和胶层失效模型, 每层为 0.15 mm 厚的 24 层复合材料铺层。层合板采用六面体 C3D8R 离散而成, 层间和胶层采用 COH3D8 单元离散而成, 本文对 CFRP 层合板进行了逐层划分网格, 网格的划分方式为结构网格, 并对接头处网格进行细化。接头处网格单元尺寸: 长×宽×厚为 0.5 mm×0.25 mm×0.15 mm。在层合板上被连接件邻近胶层的两铺层之间插入厚为 0 的 cohesive 单元用以预测层合板分层损伤, 并通过用户材料子程序 VUMAT 来实现。有限元模型的边界条件如下: 左端完全固定, 右端沿 x 方向施加轴向

位移载荷。

图3 CFRP 层合板三维胶接结构有限元模型

3 结果与讨论

3.1 胶接参数对单搭胶接结构力学性能的影响

为了研究搭接长度和宽度、铺层方式和胶层厚度对胶接结构的连接性能的影响, 引入搭接剪切强度和拉伸强度, 表达式如下

$$\tau_L = U_L / (L \times W) \quad (14)$$

$$\sigma_L = U_L / (h \times W) \quad (15)$$

式中, τ_L 为搭接剪切强度; σ_L 为拉伸强度; U_L 为极限失效载荷; L 为搭接长度; h 为层合板厚度; W 为搭接宽度。

3.1.1 搭接长度的影响

本文采用胶层厚度均为 0.12 mm, 被胶接件宽度为 25 mm, 铺层方式为 [45/0/-45/90]_{3s} 的单搭胶接结构来研究搭接长度对单搭胶接结构连接性能的影响, 铺层方式用 A 来表示。

图 4 为 CFRP 层合板单搭胶接结构在不同搭接长度时数值模拟的极限失效载荷和文献[20]中试验得到的极限失效载荷的对比结果, 可以看出, 当搭接长度 L 增大时, 极限失效载荷逐渐增大并趋于稳

图4 不同搭接长度时数值和试验的极限失效载荷对比

定, 仿真与试验结果相比其相对误差均小于 10%, 因此可以用数值模拟方法对单搭接胶接结构的力学性能进行分析。

图 5 给出了搭接长度 $L=20\text{ mm}$ 时载荷和位移的变化关系, 可以看出, 数值结果与文献[20]的试验结果变化趋势相同, 但是位移越大, 数值极限载荷曲线在试验曲线的上方, 主要是因为试验件制作时粘接区域胶层存在分布不均匀、气泡、微小开裂等内部初始缺陷, 但误差为 7.5%, 再次验证了数值方法的精确性。

图 5 搭接长度 $L=20\text{ mm}$ 时试验和仿真的载荷-位移曲线

图 6 为单搭接胶接结构的剪切强度和拉伸强度随不同搭接长度的变化曲线, 由图 6 可知, 当搭接长度增加时, 剪切强度逐渐减小, 原因是随着搭接长度的增大胶接面积也变大, 而失效载荷趋于稳定值, 拉伸强度先随着搭接长度 L 的增大迅速增大, 再缓慢增大, 最后趋向稳定值, 呈现出非线性变化的趋势。

图 6 不同搭接长度单搭接胶接结构的拉伸和剪切强度的变化曲线

图 7a、7b 给出了 CFRP 层合板单搭接胶接结构的胶层自身剪切失效和层合板层间分层失效, 其中, SDEG 为胶层和层间的失效程度指标, 浅色代表失

效, 深色代表完好, 均沿 45° 方向破坏, 原因是邻近胶层的 CFRP 层合板首层纤维是 45° 。当搭接长度 L 的取值在 $5\sim 20\text{ mm}$ 时, 随着 L 的变大, CFRP 单搭接胶接结构的胶层自身剪切失效程度逐渐变小, 层合板分层失效程度逐渐变大, 验证了极限失效载荷随着搭接长度 L 的变大而逐渐变大, 而剪切强度逐渐变小。

图 7 不同搭接长度 CFRP 层合板单搭接胶接结构的胶层自身剪切失效及层合板层间分层失效

本文选取胶接长度 20 mm 的单搭接胶接结构沿宽度方向的对称轴线进行 S_{33} 应力分析, 根据历程输出中极限失效载荷和位移的关系选取 4 个具有代表性的加载点 ($\mu=0.1\text{ mm}$, 0.3 mm , 0.4 mm , 0.6 mm)。

图 8 和图 9 分别为胶层和被连接件层合板层间的法向应力分布, 可以看出, 胶层的 S_{33} 曲线对称分布, 层合板的层间的 S_{33} 曲线非对称分布, 原因在于胶层在 CFRP 层合板单搭接胶接结构被连接件的中间区域, 两端所受的力矩相等, 而层合板层间位于上被连接件, 两端所受弯矩不相等。随着位移加载点的增大, 胶层和层合板层间的两端 S_{33} 应力逐渐减小, 且当位移加载点为 0.6 mm 时, 胶层和层间的两端 S_{33} 急剧下降, 中间 S_{33} 随着加载点的增加绝对值逐渐变大, 验证了胶层和层合板层间从两端开始失效并沿 x 轴向中间损伤扩展。

图 8 胶层法向应力 S_{33}

图 9 层合板层间法向应力 S_{33}

3.1.2 铺层方式的影响

本文采用搭接长度 $L=20$ mm, 胶层厚度 $T=0.12$ mm, 搭接宽度 $W=25$ mm 的 CFRP 层合板单搭胶接结构来研究不同铺层方式对接头力学性能的影响, 其中, 这 4 种铺层方式为 $[45/0/-45/90]_{3s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{3s}$ 、 $[0/45/-45/90]_{3s}$ 、 $[0_3/90_3]_{2s}$ 分别用 A、B、C、D 来表示。

图 10 为 4 种不同铺层方式的单搭胶接结构极限失效载荷和位移变化曲线关系, 由图 10 可知, 采用铺层方式 D 的单搭胶接结构所能承受的极限失效载荷最大, 而采用铺层方式 B 所能承受的失效载荷最小, 原因在于铺层方式 D 临近胶层的 CFRP 层合板第一层纤维方向为 0° , 而铺层方式 B 的 CFRP 层合板第一层为 90° , 从图 10 还可以得出, 当第一层纤维方向从 90° 到 0° 减少时, 单搭胶接结构所能承受的极限失效载荷逐渐增大, 当第一层纤维方向相同时, CFRP 层合板的第二层纤维方向越小单搭胶接结构所能承受的极限失效载荷越大。因此, 临近胶层的 CFRP 层压板首层的纤维铺设方向对胶接接头的连接性能影响最大。

图 10 不同铺层方式的 CFRP 层压板单搭胶接结构的载荷-位移曲线

图 11 为 CFRP 层合板单搭胶接结构在 4 种不同

铺层顺序时的拉伸和剪切强度, 从图 11 中可知, 铺层 D 的胶接拉伸和剪切强度最大, 而 B 的最小。原因是邻近胶层的 CFRP 层合板第一层纤维铺设方向的角度逐渐变小, 与图 10 中所得的结论相同。

图 11 CFRP 层合板单搭胶接结构在 4 种不同铺层顺序时的拉伸和剪切强度变化曲线

图 12a、12b 分别为不同铺层方式单搭胶接结构的胶层自身剪切失效和层合板层间分层失效, 由图 12 可知, 对于铺层方式 A 的失效形式, 胶层沿 45° 方向失效, 而邻近胶层的 CFRP 层合板层间从胶接区域的一角沿 45° 方向失效, 且层间的失效程度比胶层失效程度小。铺层方式 B, 胶层从胶接结构的两端沿 90° 方向失效, 而邻近胶层的 CFRP 层合板层间沿两端 80° 方向失效, 且层间失效程度比胶层失效程度大。铺层方式 C 和 D 失效形式一致, 胶层沿两端 $80^\circ \sim 90^\circ$ 方向失效, 而邻近胶层的 CFRP 层合板层间基本没有失效, 因此, 铺层方式 C 和 D 与 B 相比, 层合板层间基本没有失效, 而胶层大部分区域失效验证了采用铺层方式 D 的承载能力最好, 且层间不易产生失效。

图 12 不同铺层方式单搭胶接结构的胶层自身剪切失效及层合板层间分层失效

图 13、14 为不同铺层方式的单搭胶接结构沿宽度方向对称位置进行 S_{33} 应力分析, 加载点均为

0.4 mm。由图 13、14 可知, 铺层方式为 $[90/45/-45/0]_{3s}$ 的胶层法向应力为非对称分布, 验证了铺层方式 B 单搭接胶接结构的失效沿 90° 方向扩展, $[0/45/-45/90]_{3s}$ 和 $[0_3/90_3]_{2s}$ 胶层法向应力为对称分布, 验证了铺层方式 C 和 D 的单搭接胶接结构的损伤从两端沿 $80^\circ \sim 90^\circ$ 方向扩展, 而 4 种铺层方式的层间法向应力 S_{33} 均为非对称分布, 且左端 S_{33} 急剧下降, 铺层方式 $[0_3/90_3]_{2s}$ 胶层和层间的 S_{33} 应力曲线位于铺层方式 $[90/45/-45/0]_{3s}$ 的应力曲线下面, 验证了铺层方式 B 首先发生失效, 铺层方式 D 的极限失效载荷和剪切强度较大。

图 13 不同铺层方式胶层法向应力 S_{33}

图 14 不同铺层顺序层间法向应力 S_{33}

3.1.3 胶层厚度的影响

本文基于 5 种不同胶层厚度的 CFRP 层合板单搭接胶接结构模型进行数值分析, 式中, 胶接长度 L 为 20 mm, 搭接宽度 W 为 25 mm, 铺层方式为 $[0_3/90_3]_{2s}$, 图 15 为不同胶层厚度 CFRP 单搭接胶接结构的极限失效载荷和位移关系的变化曲线, 由曲线趋势可知, 当胶层厚度逐渐增大时, 单搭接胶接结构的极限失效载荷逐渐减小, 原因在于单搭接胶接结构存在偏心载荷的影响, 且当胶层厚度变厚时, CFRP 层合板单搭接胶接结构所受到的偏距

逐渐变大。

图 15 不同胶层厚度的载荷-位移变化曲线

图 16 为不同胶层厚度 CFRP 层合板单搭接胶接结构的拉伸和剪切强度变化曲线图, 由图 16 可知, 拉伸强度和剪切强度均随着胶层厚度的变大而逐渐变小, 和载荷位移变化趋势相同, 原因是胶层厚度发生了变化, 但是胶接区域并没有发生变化。

图 16 不同胶层厚度单搭接胶接结构的拉伸和剪切强度变化曲线

对于不同胶层厚度的单搭接胶接结构的胶层自身剪切失效和层合板层间分层失效和铺层方式 D 的失效方式相同, 都为胶层从两端沿 $80^\circ \sim 90^\circ$ 方向失效, 层合板层间基本没有失效。

图 17、18 分别为不同胶层厚度的单搭接胶接结构沿宽度方向对称位置进行 S_{33} 的应力变化曲线, 加载点均为 0.5 mm, 选取的胶层厚度为 0.06 mm、0.18 mm、0.24 mm 和 0.30 mm。由图 17、18 可知, 胶层剥离应力 S_{33} 呈对称分布, 而复合材料层压板层间剥离应力 S_{33} 呈非对称分布。当胶层厚度增大时, 层间和胶层两端的法向应力 S_{33} 逐渐变小。当胶层厚度越厚越大时, 胶接区域的胶层法向更容易产生剥离失效。

图 17 胶层对称位置法向应力 S_{33} 图 18 不同胶层厚度层间对称位置法向应力 S_{33}

3.1.4 搭接宽度的影响

本文采用胶接长度为 20 mm, 胶层厚度为 0.06 mm, 铺层方式为 $[0_3/90_3]_{2s}$, 胶接宽度分别为 10 mm、20 mm、30 mm 和 40 mm 的 CFRP 层合板单搭胶接结构来研究不同胶接宽度对接头力学性能的影响。图 19 为不同搭接宽度单搭胶接结构的载荷位移变化曲线, 图 19 中失效载荷随着搭接宽度的增加呈线性变化, 但搭接宽度增加一倍时极限失效载荷也增加相同的倍数, 即增加宽度可明显提高单搭胶

图 19 不同搭接宽度的载荷和位移关系的变化曲线

接结构的刚度, 当空间一定时, 增加搭接宽度能更好地提高 CFRP 层合板单搭胶接结构的力学性能。

图 20 给出了拉伸强度和剪切强度随不同搭接宽度的变化曲线, 由图 20 可知, 搭接宽度增加或者减小时, 拉伸强度和剪切强度几乎没有变化, 主要是由于胶接结构的极限失效载荷随搭接宽度线性增加, 而胶接结构的胶接面积也在增加。

图 20 不同搭接宽度 CFRP 层合板单搭胶接结构的拉伸和剪切强度变化曲线

对于不同搭接宽度的单搭胶接结构的胶层自身剪切失效和层合板层间分层失效和铺层方式 D 的失效方式相同。都为胶层从两端沿 $80^\circ \sim 90^\circ$ 方向失效, 层合板层间基本没有失效。

图 21、22 为不同搭接宽度的单搭胶接结构沿宽度方向对称位置的 S_{33} 应力分析曲线, 加载点均为 0.5 mm。由图 21、22 可知, 不同搭接宽度的单搭胶接结构胶层的法向应力 S_{33} 呈对称分布, 而层合板层间的法向应力呈非对称分布, 左端 S_{33} 急剧下降, 当搭接宽度变大时, 胶层法向应力 S_{33} 变小, 验证了 $[0_3/90_3]_{2s}$ 的失效形式大部分为胶层自身剪切失效。

图 21 搭接宽度不同时胶层法向应力 S_{33}

图 22 搭接宽度不同时层间法向应力 S_{33}

3.2 胶接参数的优化

本文采用拉丁超立方(Latin hypercube sampling, LHS)方法选取 12 组单搭胶接结构的样本点, 进行数值模拟, 得到极限失效载荷, 并求出拉伸强度, 采用二次多项式响应面法(Response surface method, RSM)得到拉伸强度的代理模型, 且基于遗传算法对拉伸强度进行联合优化, 得到合理的单搭胶接结构胶接参数。

3.2.1 代理模型结果与分析

本文中, 搭接长度 L 的取值范围为[5, 20], 搭接宽度 W 的取值范围为[10, 40], 胶层厚度 T 的取值范围为[0.06, 0.30], 铺层方式为 $[0_3/90_3]_{2s}$, 根据以上取值范围, 基于拉丁超立方(LHS)方法在 Matlab 中进行编程随机抽取 12 个样本点, 并进行数值模拟, 得到单搭胶接结构的极限失效载荷 F 并计算出拉伸强度 σ , 如表 3 所示。

表 3 样本点及数值模拟结果

样本序号	搭接长度/mm	胶层厚度/mm	搭接宽度/mm	失效载荷/kN	拉伸强度/MPa
1	18.38	0.157	17.25	8.123	130.81
2	12.78	0.110	20.24	8.269	113.48
3	16.11	0.144	27.36	12.43	126.22
4	17.74	0.081	22.58	10.7	131.64
5	16.78	0.089	28.38	13.23	129.51
6	13.48	0.147	18.32	7.673	116.35
7	14.15	0.129	31.52	13.57	119.63
8	10.89	0.139	30.38	11.17	102.16
9	15	0.12	25	11.08	123.08
10	15.24	0.098	21.38	9.575	124.41
11	11.71	0.101	25.47	9.814	107.03
12	18.83	0.126	32.35	15.41	132.33

根据以上结果, 以 L 、 T 和 W 为自变量, 拉伸

强度为因变量, 基于响应面法建立二次多项式响应面代理模型, 如式(16)所示

$$\begin{aligned} \sigma = & -17.8 + 14.521L + 115T - 0.137W - \\ & 0.3386L^2 - 240T^2 + 0.00416W^2 - \\ & 4.57LT - 0.00288LW - 0.28TW \end{aligned} \quad (16)$$

引入复相关系数 R^2 , 回归方程的 R^2 表明试验值和预测值的偏差, R^2 值的范围为[0, 1], 当复相关系数的值比较大时, 回归值与仿真值的偏差就越小, 式(16) R^2 的值为 0.99。由以上分析可得建立的拉伸强度二次多项式代理模型可以进行胶接结构的力学性能分析。

经分析, 得出具有显著性关联作用项 L 、 T 和 W 对拉伸强度的三维响应面图及其等值线图。图 23 给出了当 $L=20$ mm、 $T=0.06$ mm 和 $W=25$ mm 时, L 、 T 和 W 对单搭胶接结构拉伸强度的影响。图 23a 和 22b 可知, 当 T 和 W 不变时, 随着 L 的增大拉伸强度逐渐增大并趋于稳定值, 验证了图 6 得出的结论; 由图 23a 和 23c 可知, 当 L 和 W 固定不变时, 随着 T 的增大, 拉伸强度逐渐减小, 和图 16 得出的结论一致。由图 23 可得出胶接参数 L 、 T 和 W 之间的关联性, 同时也体现了多项式响应面代理模型对单搭胶接结构的多个胶接参数进行联合优化的重要性。

(a) $W=25$ mm

图 23 拉伸强度 σ 的三维响应面图和等值线图

3.2.2 遗传算法优化结果与分析

由第 3.2.1 节得到 CFRP 层合板单搭胶接结构拉伸强度的二次多项式响应面代理模型, 基于遗传算法进行求解, 综合考虑胶接参数的取值范围和计算周期以及结果所包含的范围, 基于 Matlab 进行编程, 胶接参数等决策量采用二进制编码, 初始化总群数目设置为 100, 每一代精英数目为 10, 交叉概率为 0.75, 后代变异比例为 0.005, 适应度函数为响应面代理模型, 适应度函数偏差为 10^{-6} , 遗传代数 50 代, 在遗传过程中基于单点交叉的变异方式。

图 24 给出了拉伸强度遗传进化过程, 可知平均适应度值和最佳适应度值随着遗传代数的增加逐渐趋于相同的值。即 CFRP 层合板胶接结构最大适应度函数值为 136 MPa、最佳个体 L 为 20 mm, T 为 0.060 7 mm, W 为 10 mm, 与常规方案即 L 、 T 和 W 分别为 20 mm、0.12 mm 和 25 mm 相比, 拉伸强度和剪切强度分别提高了 25.92% 和 25.88%。验证了遗传算法在 CFRP 层合板单搭胶接结构中应用的精确性。

图 24 拉伸强度最优和平均适应度值变化曲线

4 结论

本文通过对不同搭接长度 L 、搭接宽度 W 、胶层厚度 T 和搭接方式的 CFRP 单搭胶接结构进行数值模拟, 研究了其结构性能, 并进行了优化, 得出以下结论。

(1) 当搭接长度逐渐变大时, 失效载荷和拉伸强度也逐渐变大且趋于稳定值, 剪切强度却变小; 铺层方式 D 的失效载荷、拉伸和剪切强度最大, 而铺层方式 B 的最小; 增加搭接宽度能更好地提高 CFRP 单搭胶接结构的承载性能; 合理的胶接参数可以提高胶接结构的力学性能。

(2) 随着 L 和 T 的增加, 胶层自身剪切失效程

度变小,而层合板层间分层失效程度变大;搭接方式 B 的胶层剪切失效程度最小,层间分层失效程度最大。

(3) 当 $L=20\text{ mm}$ 时,位移加载点增大,胶层和层间的两端法向应力逐渐减小;铺层方式 A、C 和 D 的胶层法向应力呈对称分布,而铺层方式 B 的胶层法向应力呈非对称分布,层间法向应力均为非对称分布。

(4) 采用响应面法验证了拉伸强度与胶接参数之间的关联性,基于遗传算法得到了 CFRP 层合板单搭胶接结构的最优解。与常规方案进行对比,拉伸强度和剪切强度分别提高了 25.92% 和 25.88%,为单搭胶接结构的结构设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] ABUSREA M, ARAKAWA K. Improvement of an adhesive joint constructed from carbon fiber-reinforced plastic and dry carbon fiber laminates[J]. *Composite Part B* 2016, 97: 368-373.
- [2] YANG C Q, WANG X L, JIAO Y J, et al. Linear strain sensing performance of continuous high strength carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Composite Part B* 2016, 102: 86-93.
- [3] CHOWDHURY N, WANG J, CHIU W, et al. Experimental and finite element studies of thin bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures[J]. *Composite Part B*, 2016, 85: 233-242.
- [4] 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. LÜ Shengli, CHENG Qiyong, YAO Leijiang, et al. Optimization design of adhesive bonding repair of damaged composite laminates[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(4): 598-600.
- [5] 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 Yaqiong, CHEN Yang, LI Na, 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.
- [6] KIM M H, HONG H S. An adaptation of mixed-mode I + II continuum damage model for prediction of fracture characteristics in adhesively bonded joint[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 80: 87-103.
- [7] HAMIT A. Effect of overlap length and scarf angle on the mechanical properties of different adhesive joints subjected to tensile loads[J]. *Materials Testing*, 2017, 59: 536-546.
- [8] AKPINAR I A, GULTEKIN K, AKPINAR S, et al. Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints[J]. *Composites Part B*, 2017, 126: 143-152.
- [9] JIANG Z W, WAN S, KELLER T, et al. Two-dimensional analytical stress distribution model for unbalanced FRP composite single-lap joints[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2017, 66: 341-355.
- [10] KHAN M A, AGLITTI G S, CROCOMBE A D, et al. Development of design allowables for the design of composite bonded double-lap joints in aerospace applications[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 82: 221-232.
- [11] 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.
- [12] RIBEIRO T E A, CAMPILHO R D S G, DA S L F, et al. Damage analysis of composite aluminium adhesively bonded single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2016, 13: 25-33.
- [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] 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.
- [16] 吴义韬,姚卫星,吴富强.复合材料层合板面内渐进损伤分析的 CDM 模型[J]. *力学学报*, 2014, 46(1): 94-104. WU Yitao, YAO Weixing, WU Fuqiang. CDM model for intralaminar progressive damage analysis of composite laminates[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(1): 94-104.
- [17] 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 Xuezhou, LI Cheng, TIE Ying, et al. Influence of

- patch shape and size on adhesively bonded composite repair[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(20): 63-69.
- [18] 段元欣, 张开富, 王中强, 等. L 形碳纤维增强复合材料/铝合金胶接复合构件剥离应力建模与分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(2): 44-50.
- DUAN Yuanxin, ZHANG Kaifu, WANG Zhongqiang, et al. Peeling stress model and analysis of single-l carbon fiber reinforced plastic/polymer/Al composite component [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(2): 44-50.
- [19] 侯文彬, 刘璟琳, 陈广义, 等. 胶层缺陷对接接-拉铆搭接剪切接头力学性能影响研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(24): 37-44.
- HOU Wenbin, LIU Jinglin, CHEN Guangyi, et al. Effect of defects in adhesive layer on the mechanical property of hybrid bond-riveted lap shear joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(24): 37-44.
- [20] 毛振刚, 侯玉亮, 李成, 等. 搭接长度和铺层方式对 CFRP 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 laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 121-131.
- [21] 鲁大伟, 李书. 应用免疫遗传算法优化设计层合板铺层顺序[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(2): 247-250.
- LU Dawei, LI Shu. Application of immune genetic algorithm to optimize the design of laminate ply sequence [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(2): 247-250.
- [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: 403-413.
- [23] 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.
- [24] SUN L G, LI C, TIE Y, et al. Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads[J]. *Int. J. Adhesion Adhes.*, 2019, 95: 102402.
- [25] ERDAL O, SONMEZ F O. Optimum design of composite laminates for maximum buckling load capacity using simulated annealing[J]. *Composite Structures*, 2005, 71: 45-52.
- [26] MAHDI A N, KAZEM F, DAMINO P, et al. Surrogate-based multi-objective optimization of a composite laminate with curvilinear fibers[J]. *Composite Structures*, 2012(94): 2306-2313.
- [27] 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.
- [28] 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.
-
- 作者简介: 胡春幸, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为复合材料胶接结构。
E-mail: huchunxing2020@163.com
- 侯玉亮, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料力学与结构优化设计。
E-mail: yulianghou@zzu.edu.cn
- 铁瑛, 女, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料机械强度。
E-mail: tieying@zzu.edu.cn
- 李成(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复合材料力学。
E-mail: chengli@zzu.edu.cn
- 毛振刚, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为复合材料损伤分析。
E-mail: 1358434420@qq.com