

纤维铺层方式对 CFRP-铝合金单搭接胶接接头拉伸性能影响

邹田春, 李龙辉, 符 记, 李 晔, 巨乐章
(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘 要: 为了分析异质材料胶接接头内部典型应力分布规律与刚度退化特点,探究不同铺层方式对异质材料单搭接胶接接头内部应力分布状态影响规律,开展试验和仿真相关研究。首先,制备不同铺层方式的 CFRP(carbon fiber reinforce plastic)-铝合金单搭接胶接接头试验件,使用拉伸试验机进行拉伸试验,获得基本试验数据。其次,利用连续损伤模型、3D Hashin 失效判据和 Cohesive Zone Model 研究异质材料胶接接头不同部位典型破坏特点。结果表明,随着复合材料板中 0°铺层比例增加,胶接接头极限载荷呈现增加趋势,与之相反接头拉伸位移逐渐缩短。接头铺层方式与载荷方向共同影响胶接接头力学性能,当复合材料板内部各个方向纤维铺层较为均匀时,可以有效降低接头应力集中,载荷方向与铺层纤维方向一致时,可有效提高接头连接强度。复合材料板中 0°铺层占比对接头的极限载荷和刚度退化(scalar stiffness degradation, SDEG)影响较大,0°占比越小接头承载能力越弱,接头刚度退化越复杂。

关 键 词: 复合材料; 铺层方式; 单搭接胶接; 应力分布; 刚度退化

中图分类号: V214.8

文献标志码: A

Effect of fiber layup methods on tensile properties of CFRP-aluminum alloy single-lap adhesive joint

ZOU Tianchun, LI Longhui, FU Ji, LI Ye, JU Yuezhong

(College of Safety Science and Engineering,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to analyze the typical stress distribution rules and stiffness degradation characteristics of dissimilar material adhesive joints, the effects of different layup methods on the internal stress distribution state of dissimilar material single-lap adhesive joints were studied, and then tests and simulations were carried out. First, the CFRP (carbon fiber reinforce plastic)-Al single-lap adhesive joint test pieces with different layup methods were prepared, the tensile testing machine was used to perform tensile tests, and the basic test data were obtained. Second, the continuous damage model, 3D Hashin failure criterion and Cohesive Zone Model were used to study the typical failure characteristics of different parts of the dissimilar material transfer joint. The results showed that as the proportion of 0° layup in the composite plate increased, the ultimate load of the adhesive joint showed an increasing trend, on the contrary, the tensile displacement of the joint gradually decreased. The joint layup method and the load direction affected the

收稿日期: 2021-04-23

作者简介: 邹田春, (1976—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空器材料与结构等方面研究。

通信作者: 李龙辉, (1995—), 男, 硕士生, 主要从事复合材料胶接力学性能研究。E-mail: lilonghui95@163.com

引用格式: 邹田春, 李龙辉, 符记, 等. 纤维铺层方式对 CFRP-铝合金单搭接胶接接头拉伸性能影响[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1905-1914. ZOU Tianchun, LI Longhui, FU Ji, et al. Effect of fiber layup methods on tensile properties of CFRP-aluminum alloy single-lap adhesive joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1905-1914.

mechanical properties of the adhesive joint. When the fibers in all directions inside the composite plate were relatively uniform, the stress concentration of the joint can be effectively reduced. When the load direction was consistent with the direction of the laminated fibers, the joint strength can be effectively improved. The proportion of 0° layer in the composite plate had a greater effect on the ultimate failure load and SDEG (scalar stiffness degradation) of joint. The smaller proportion of 0° indicated the weaker bearing capacity of the joint and the more complex SDEG of joint.

Key words: composite; layup method; single lap adhesive joint; stress field distribution; stiffness degradation

复合材料是一种比模量高、比强度高、可回收性好的轻量化材料,在航空航天制造领域得到了广泛的关注,尤其是高性能的碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforce plastic, CFRP)逐渐变为主承力结构^[1-6]。但复合材料力学特性较为复杂,目前无法完全替代金属材料,不可避免有复合材料和金属材料连接的结构。常见的连接方式有机械连接(螺栓连接、铆钉连接等)和胶接连接^[7-10]。复合材料弹性模量较小,传统的机械连接会出现较大的应力集中,而胶接连接传力平稳,可以提高连接效率^[11-15]。因此,胶接连接已成为复合材料与金属连接结构设计的发展方向。

近年来,复合材料胶接连接问题越来越受到关注,国内外学者对复合材料黏接技术进行深入研究,建立了基于损伤演化的胶接模型^[16-20]。研究表明,胶接接头的搭接长度、铺层方式、被胶接材料等对胶接接头的力学性能都有较大影响^[21-22]。Murat 等^[23]通过试验与仿真相结合的方法研究铺层方式为 $[\pm 10]_{5s}$ 、 $[\pm 20]_{5s}$ 、 $[\pm 45]_{5s}$ 、 $[\pm 55]_{5s}$ (其中,5为堆叠次数,s表示对称)的玻璃纤维复合材料单搭接胶接接头力学性能。结果表明,当铺层方式为 $[\pm 10]_{5s}$ 和 $[\pm 20]_{5s}$ 时,单搭接胶接接头发生脱黏现象,而当铺层方式为 $[\pm 45]_{5s}$ 和 $[\pm 55]_{5s}$ 时,复合材料板内部发生损伤,对接头进一步分析发现,当铺层角度小于 40° 时胶接接头的胶黏剂易发生损坏,当铺层角度大于 40° 时,复合材料板易发生损伤。Satthumnuwong 等^[24]通过对胶接接头研究发现,碳/环氧树脂层合板单搭接接头的整体与局部效应的关系。结果表明,胶接接头整体强度取决于层压板的局部取向和整体性能, 0° 铺层是导致复合材料板内部分层的主要原因,但是层压板内的 0° 铺层会提高胶接接头的弯曲刚度和连接强度。Ferhat 等^[25]通过试验与仿真相结合的方法验证了仿真模型的有效性,研究了 $[\pm 10]_{5s}$ 、

$[\pm 20]_{5s}$ 、 $[\pm 45]_{5s}$ 三种铺层方式胶接接头失效机理。结果表明, $[\pm 20]_{5s}$ 、 $[\pm 45]_{5s}$ 两种胶接接头主要发生胶层脱黏和复合材料板层间损伤,而 $[\pm 10]_{5s}$ 主要为胶层脱黏,进一步对胶接接头分析发现,被胶接件或者铺层较厚、铺层角度过大均会导致被胶接件内部应力过大,从而发生层间损伤。目前国内外学者主要针对铺层方式对复合材料胶接接头力学性能的研究较多,但其中对航空航天领域复合材料-铝合金胶接接头的研究较少,尤其是碳纤维复合材料铺层方式变化对 CFRP-Al 胶接接头内部应力分布与破坏机制研究尚不成熟。

本文首先对铺层方式为 $[45/-45]_{4s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的 CFRP-铝合金单搭接(single lap joint, SLJ)接头在室温下进行拉伸试验,获得胶接接头载荷-位移曲线。其次,利用 ABAQUS 有限元软件建立连续损伤力学模型,创新性地提出了使用 cohesive zone model(CZM)对复合材料板前 5 层树脂进行模拟,同时使用 VU-MAT 子程序编写 3D Hashin 失效判据模拟复合材料板的受载过程与刚度退化情况。最后,分析了铺层方式变化对胶接接头内部应力分布规律的影响,探究了铺层方式变化对胶接接头失效机理的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及制造工艺

CFRP 层合板使用碳纤维单向带预浸料/环氧树脂(USN15000/7901,见表 1)制备,由芜湖钻石飞机制造厂制造,铺层为 $[45/-45]_{4s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$,层数为 16,尺寸为 $165\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,采用热压罐成型工艺固化。具体固化流程为,首先以 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从室温升到 80°C ,在 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 下保温 30min,然后以 $1.7^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 80°C 升到 130°C ,并

在 $130\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 180min,最后以 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率从 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,全程压力 $0.26\pm 0.03\text{ MPa}$,固化流程图如图 1 所示。铝合金牌号为 A17075,尺寸为 $165\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,胶黏剂为 Araldite 2015(见表 2),由 Huntsman 公司制造。参照 ASTM D5868-01 标准制备单搭接胶接夹具^[26],如图 2 所示,在室温条件下($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)使用夹具黏接 CFRP-铝合金单搭接接头,然后室温静置固化 48h,复合材料板被胶接件使用以上 3 种铺层方式的板件,搭接长度设置为 40 mm ,胶层厚度为 0.5 mm ,每组制备 3 个试验件,共计 9 个,尺寸如图 3 所示。

表 1 复合材料 CFRP/7901 材料力学性能
Table 1 Composite material mechanical properties of CFRP/7901

参数	数值
拉伸模量 E_{11}/MPa	121 000
拉伸模量 E_{22}/MPa	8 600
拉伸模量 E_{33}/MPa	8 600
切变模量 G_{12}/MPa	3 450
切变模量 G_{13}/MPa	3 450
切变模量 G_{23}/MPa	2 800
泊松比	0.301
密度 (kg/m^3)	1 467

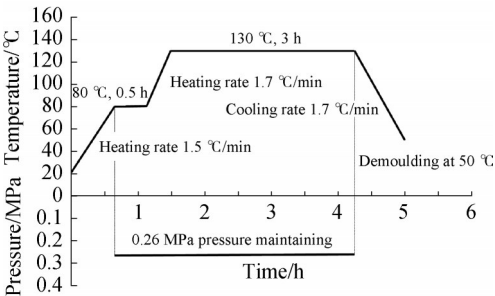


图 1 复合材料板固化流程
Fig.1 Curing process of composite plate

表 2 Araldite 2015 胶黏剂材料力学性能
Table 2 Adhesive material mechanical properties of Araldite 2015

参数	数值
弹性模量/MPa	1 850
拉伸强度/MPa	21.63
剪切强度/MPa	17.9
密度/(kg/m^3)	1 400

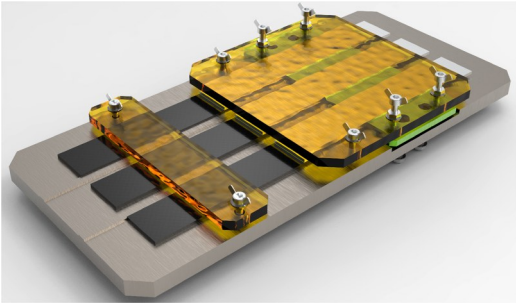


图 2 胶接夹具
Fig.2 Adhesive fixture

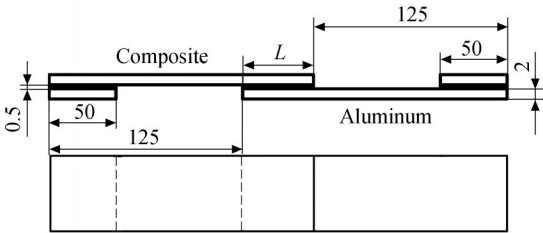


图 3 单搭接接头 (单位:mm)
Fig.3 Single lap joint (unit:mm)

1.2 试验方法

参照 ASTM D5868-01 标准在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下,使用电子万能材料试验系统(美国 Instron5982)对试样进行准静态拉伸,设置拉伸速率为 $2\text{ mm}/\text{min}$ 进行试验^[26]。将铝合金被胶接件夹紧,移动上方 CFRP 层合板实现准静态拉伸,如图 4 所示。

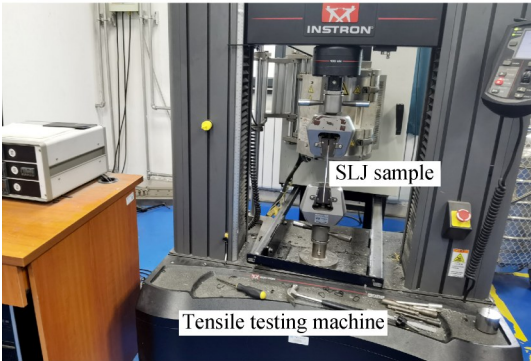


图 4 电子万能拉伸试验机
Fig.4 Electronic universal tensile testing machine

2 仿真方法

依据 3D Hashin 理论,建立 CFRP 层合板本构模型^[27]

$$\sigma = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ & 2G_{12} & \\ & & 2G_{23} \\ & & & 2G_{31} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\epsilon_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 为各方向张量剪应变, $G_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 为各方向切变模量, $C_{ij}(i, j=$

$$f_{mc} = \frac{1}{X_{2c}} \left[\left(\frac{X_{2c}}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{2S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (3)$$

纤维拉伸损伤

$$f_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1t}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (4)$$

纤维压缩损伤

$$f_{fc} = \frac{|\sigma_{11}|}{X_{1c}} \quad (5)$$

式中 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 为 1、2、3 方向上的剪切强度; X_{1t} 、 X_{1c} 、 X_{2t} 、 X_{2c} 为单层板 1、2 方向上的拉伸和压缩强度; σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为正应力; τ_{12} 、 τ_{13} 、 τ_{23} 为切应力。

本文引入损伤状态变量 d_{ft} 、 d_{fc} 、 d_{mt} 、 d_{mc} , 分别为纤维和基体的拉伸与压缩连续损伤状态变量, 其取值范围为 $[0, 1]$, 当 $d=0$ 时, 表示未发生损伤, 当 $d=1$ 时, 表示完全失效, 对应的单元将被删除。

纤维整体损伤状态变量

$$d_f = 1 - (1 - d_{ft})(1 - d_{fc}) \quad (6)$$

基体整体损伤状态变量

$$d_m = 1 - (1 - d_{mt})(1 - d_{mc}) \quad (7)$$

式中 d_{ft} 、 d_{fc} 表示纤维拉伸和压缩的损伤状态变量; d_{mt} 、 d_{mc} 表示基体拉伸和压缩的损伤状态变量。

2.1 内聚力单元模型

复合材料基体和胶层为类型 COH3D8 单元格, 基于拉伸-分离准则, 采用内聚力双线性本构模型进行分析, 如图 5 所示^[28]。

图 5 中 t_n^0 、 t_s^0 和 t_t^0 分别对应法向强度和两个方向的剪切强度, δ_m^0 、 δ_n^0 和 δ_s^0 别对应法向应变和两个方向的剪切应变。

使用二次名义应力准则判断

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (8)$$

当某一时刻等式成立时, 该处的 cohesive 单元开始发生损伤, 然后出现刚度退化。

1, 2, 3) 为各方向刚度系数。CFRP 主要有四种损伤模式, 损伤起始判据如下:

基体拉伸损伤

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

基体压缩损伤

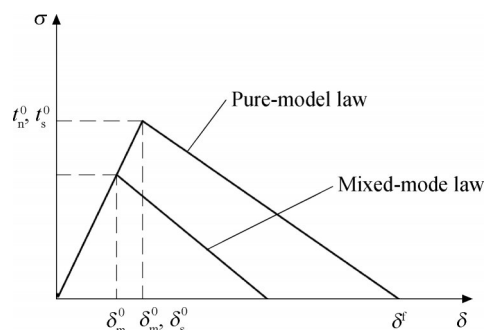


图 5 内聚力单元双线性本构模型^[28]

Fig.5 Cohesive element bilinear constitutive model^[28]

混合模式下的临界应变能释放率通过 B-K (Benzeggagh-Kenane) 准则计算

$$G_{tc} = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II}}{G_t} \right)^m \quad (9)$$

式中 m 与材料参数相关, 在本文中 $m=1.35$, G_{Ic} 、 G_{IIc} 分别为法向和剪切方向断裂能。

2.2 仿真模型

基于以上复合材料损伤模型和胶黏剂损伤模型, 利用 ABAQUS 有限元分析软件进行三维建模, 使用 Cohesive Zone Model 定义胶黏剂和基体本构模型, 网格类型为 COH3D8, 使用 VUMAT 子程序定义复合材料板本构模型, 网格类型为 C3D8R, 复合材料板每层纤维铺层厚度为 0.125 mm, 试验发现复合材料板的前 3 层易发生损坏, 因此创新性地对复合材料板前 5 层铺层建立树脂层, 提高计算精度。复合材料板胶接面前 5 层建立基体层, 每层厚度为 0.001 mm。铝合金端头为固支约束, 固定各个方向的平动和转动, 复合材料端头施加沿层合板轴向方向的位移, 固定其他方向的平动和转动, 实现准静态拉伸。最后将仿真模型放入 Explicit 求解器中进行求解, 图 6 为单搭接接头仿真模型。

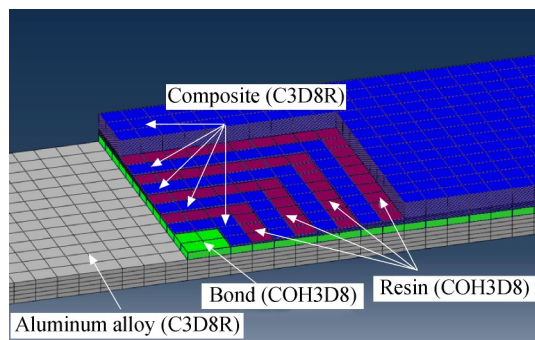


图6 SLJ仿真模型

Fig.6 Simulation model of SLJ

3 结果与讨论

3.1 载荷-位移曲线分析

图7为铺层方式 $[45/-45]_{4s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的CFRP-铝合金单搭接胶接头仿真极限载荷和试验平均极限载荷与剪切强度。对比3种铺层方式下接头极限载荷发现,仿真数值略高于试验结果,其主要原因是试验件在制作过程中内部不可避免出现轻微的缺陷,导致理论计算结果略高于试验结果。对比试验和仿真极限载荷数值,其误差小于5%,验证了仿真模型的有效性。

分析 $[45/-45]_{4s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 铺层方式胶接头仿真极限载荷发现, $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的极限载荷分别为8.15和13.04kN,与 $[45/-45]_{4s}$ 极限载荷相比,提高了35.2%和117.4%。复合材料板为各向异性材料,平行于纤维方向可以承受较大的载荷,而垂直于纤维方向受载时,主要由基体承担载荷,因此接头承载力较小,由此表明 0° 铺层占比增加会提高胶接头力学性能。

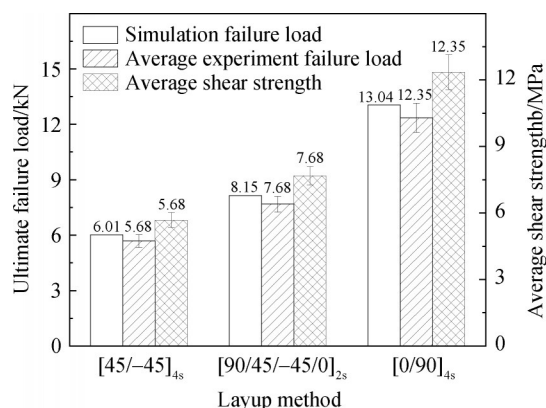


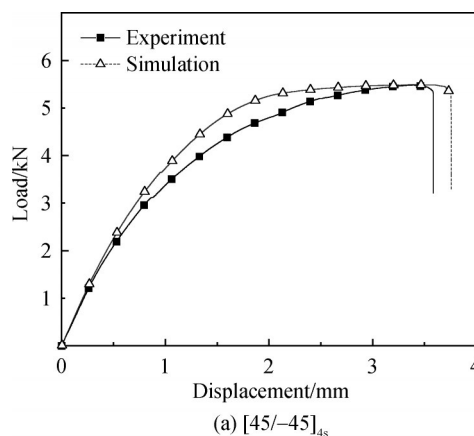
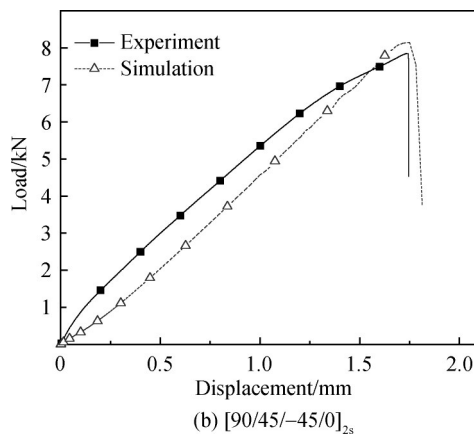
图7 平均极限载荷与剪切强度

Fig.7 Average ultimate failure load and shear strength

图8为铺层方式为 $[45/-45]_{4s}$ 、 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的胶接头典型载荷-位移曲线图,由图可知,不同铺层方式胶接头载荷-位移曲线存在较大差异,相同铺层的试验和仿真曲线误差在合理范围内,进一步验证了仿真模型的有效性。

图8(a)为铺层方式为 $[45/-45]_{4s}$ 的单搭接接头载荷-位移曲线,拉伸位移在0~3 mm阶段,载荷与位移呈线性增加趋势,表明试验件为弹性阶段。拉伸位移超过3 mm后,曲线逐渐趋于平缓,表明拉伸载荷已经趋近于极限载荷,此时胶接头内部出现损伤,直到损伤到达一定程度发生突然断裂。图8(b)、图8(c)分别为铺层方式 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的试验件,对比载荷-位移曲线发现,两试验件在受载时仅存在弹性阶段,当载荷达到接头承载能力极限时突然发生断裂。

对比三组试验的载荷与位移,发现 $[0/90]_{4s}$ 铺层的试验件极限载荷最大,拉伸位移最小,而 $[45/-45]_{4s}$ 与之相反,极限载荷最小,位移最大。其主要原因是碳纤维复合材料的弹性模量小,平行纤维方向抗拉强度较高,而垂直于纤维方向受载时,基体承受载荷,仅能承受较小的载荷。因此

(a) $[45/-45]_{4s}$ (b) $[90/45/-45/0]_{2s}$

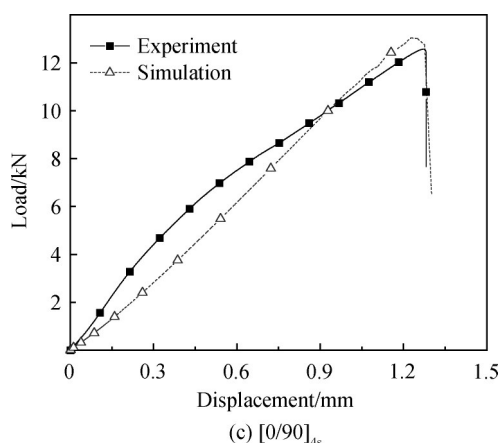


图8 不同铺层方式胶接接头载荷-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curve of adhesive joints with different layup methods

当复合材料板中平行于拉伸载荷的 0° 纤维铺层占比较多时,载荷方向与纤维方向一致,复合材料板内部树脂承受剪切载荷相对减少,导致胶接接头整体强度较大,能够承受较大的载荷。对接头拉伸位移分析发现,当复合材料板中有 $\pm 45^\circ$ 铺层时,其拉伸载荷方向与铺层角度方向呈 45° 夹角,复合材料板受到拉伸载荷时,不同纤维铺层会出现一定角度的转动,导致相邻两铺层之间的夹角小于 90° ,因此 $[45/-45]_{4s}$ 铺层接头拉伸位移最大,而 $[0/90]_{4s}$ 铺层的接头拉伸位移最短,此外不同铺层之间转动使树脂层发生损伤,降低了胶接接头的力学性能。

3.2 搭接区域应力分析

为了进一步研究胶接接头在拉伸载荷下内部的破坏特点,参照前期研究成果异质材料胶接接头在受到拉伸载荷时,刚度较小的复合材料端头会出现应力集中现象^[29]。因此对接头AB截面(见图9)胶层输出30%、60%、90%的应力曲线,分析不同铺层方式变化对接头内部应力分布影响。

图10为铺层方式为 $[45/-45]_{4s}$ 的胶接接头AB截面胶层应力分布。随着载荷增加,A点附近

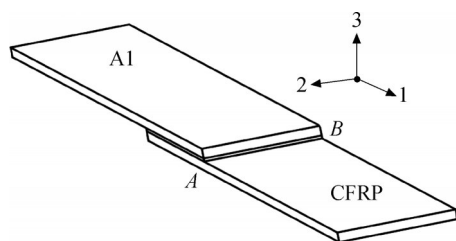


图9 单搭接接头AB截面

Fig.9 AB section of single lap joint

σ_{11} 应力出现集中现象,3 mm处应力值最大,3~25 mm处应力逐渐降低,直到应力趋近于零。观察 σ_{13} 应力,在0~3 mm处,胶层受到较大的剪切载荷,在3~25 mm处,胶层承受较小的切应力。主要原因是接头部位在传递载荷时,靠近胶层部位的铺层承受较大的载荷,远离胶接部位的铺层承载逐渐降低,而 $[45/-45]_{4s}$ 铺层的复合材料板,其第一层铺层为 $+45^\circ$,因此出现胶层上应力分布不对称的现象,最终导致A点附近搭接区域首先发生损坏。

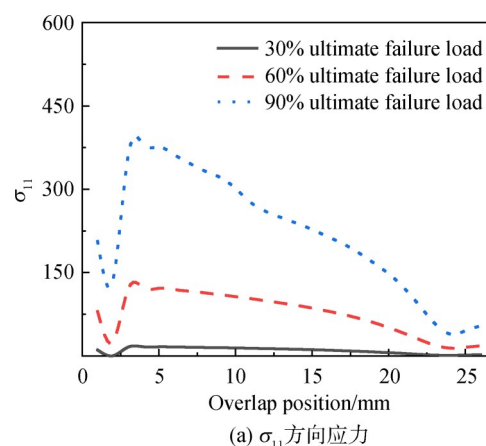
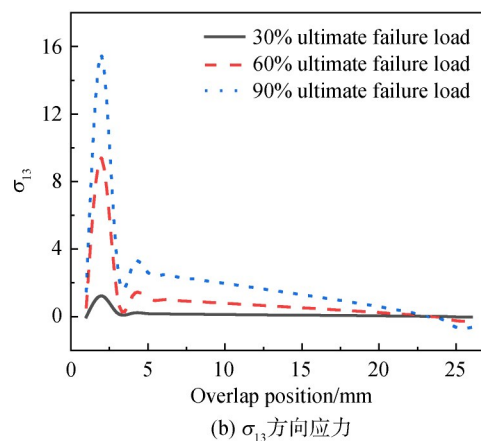
(a) σ_{11} 方向应力(b) σ_{13} 方向应力图10 $[45/-45]_{4s}$ 铺层接头AB截面应力分布Fig.10 Stress distribution of AB section of $[45/-45]_{4s}$ layup joint

图11为铺层方式为 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 的胶接接头AB截面应力分布。分析 σ_{11} 和 σ_{13} 应力,发现AB截面左右应力分布近似对称。对 σ_{11} 应力分布进行分析,随着载荷增加,AB截面应力整体均呈现负增加,但接头A、B点附近的应力高于中间部位应力。该方向上应力全部为负值,表明其受到压应力,其主要原因为复合材料板第一层为 90° 铺

层, σ_{11} 为平行于纤维方向的应力, 因此该处在拉伸载荷下 σ_{11} 为压应力。对 σ_{13} 应力分布进行分析, 随着载荷增加, AB 截面中 0~3 mm 和 22~25 mm 位置应力值较大, 而 3~22 mm 位置应力增加平稳, 表明胶接接头整体应力分布较为均匀。

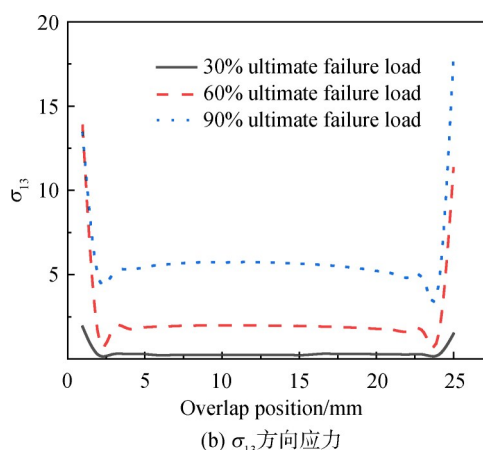
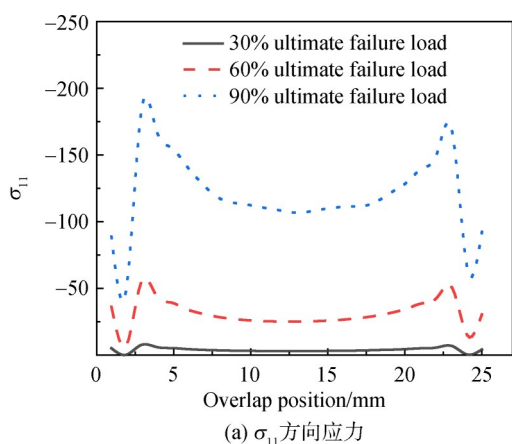


图 11 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 铺层接头 AB 截面应力分布
Fig.11 Stress distribution of AB section of $[90/45/-45/0]_{2s}$ layout joint

图 12 为铺层方式为 $[0/90]_{4s}$ 的胶接接头 AB 截面应变分布。观察 σ_{11} 和 σ_{13} 应力, 发现 AB 截面左右应力分布近似对称, 均呈现为“浴盆状”。在 0~4 mm 和 21~25 mm 处, 随着载荷增加 σ_{11} 和 σ_{13} 应力值不断增大, 但 σ_{11} 的应力值远高于 σ_{13} 的数值。在 4~21 mm 处, 接头一直处于低应力状态。表明接头主要由平行于拉伸方向的复合材料板两端承受拉伸载荷, 而在中间部位仅承受较小的载荷。

结合三种铺层方式下接头应力分布进行分析, 发现 $[45/-45]_{4s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 均会出现明显的应力集中现象, 两者不同点为 $[45/-45]_{4s}$ 应力分布

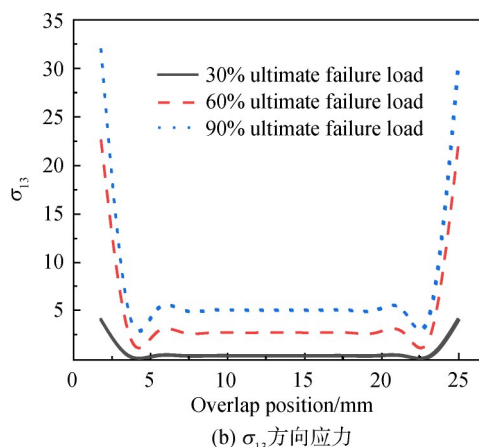
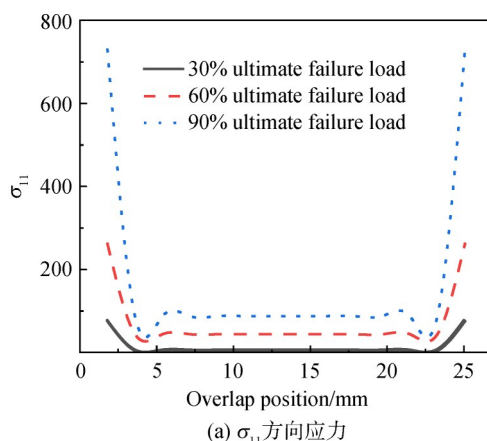


图 12 $[0/90]_{4s}$ 铺层接头 AB 截面应力分布
Fig.12 Stress distribution of AB section of $[0/90]_{4s}$ layout joint

不对称, 一侧出现较大应力集中, 而 $[0/90]_{4s}$ 应力分布对称, 左右两侧均出现应力集中现象。 $[45/-45]_{4s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 的复合材料板内部铺层之间均为 90° 夹角, 但因其纤维受力与载荷方向不同, 其力学性能出现较大的差异。 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 铺层的复合材料板所能够承受的极限载荷较 $[0/90]_{4s}$ 铺层试验件小, 但其应力分布较为均匀, 使连接结构各个方向均能承受较大的载荷, 具有较好的工程应用价值。综合以上三种铺层方式的胶接接头, 0° 铺层增多可以提高胶接接头的极限载荷, 复合材料板各个方向铺层均匀可以使接头受载时应力分布均匀, 提高接头不同方向的综合承载能力, 适合复杂受力的结构设计。

3.3 接头刚度退化分析

为了进一步探究胶接接头失效机理, 对复合材料板接头搭接部位 80%、90%、100% 载荷下的第一层纤维刚度退化 (overall scalar stiffness degradation, SDEG) 图进行分析, 探究胶接接头内部

失效过程,如图 13 所示。

图 13(a)为 $[45/-45]_{4s}$ 铺层的胶接接头第一层纤维 SDEG 图,随着载荷增加,首先在接头左侧出现了少量的单元格刚度退化。载荷增加到 90% 时,接头左侧单元格不断发生刚度退化,由复材端头向金属端头逐渐扩展。最后载荷达到 100% 时,搭接部位第一层纤维发生了大面积刚度退化,但是整体上退化的单元格偏向左侧。主要原因是复合材料板为 $[45/-45]_{4s}$ 铺层,第一层为 $+45^\circ$ 铺层,载荷在接头传递时主要加载在该铺层上,因载荷与纤维铺层呈 45° 夹角,导致第一层纤维左侧位置首先达到极限载荷,发生刚度退化。

图 13(b)为 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 铺层的胶接接头第一层纤维 SDEG 图,随着载荷增加,首先胶接接头复合材料端头出现刚度退化。载荷继续增加到达 90% 时,第一层纤维单元格刚度退化逐渐从复合材料端头向金属端头扩展,接头破坏较为均匀,未出现明显不对称的现象。最后载荷达到 100% 时,第一层纤维出现一半的损坏,损坏部位全部位于复合材料端头。复合材料第一层铺层为 90° 时,接头受到拉伸载荷时主要由下一层的基体承受剪切载荷,由于基体为各向同性材料,因此横向受力较为均匀,刚度退化较为对称。

图 13(c)为 $[0/90]_{4s}$ 铺层的胶接接头 SDEG

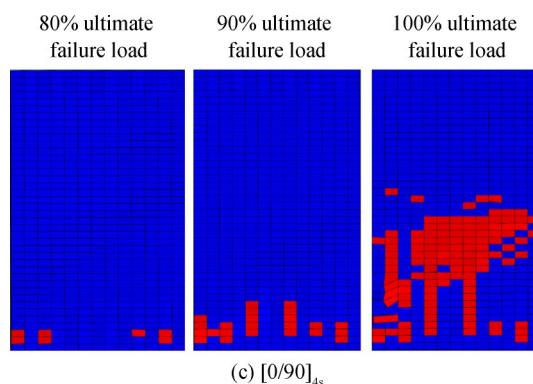
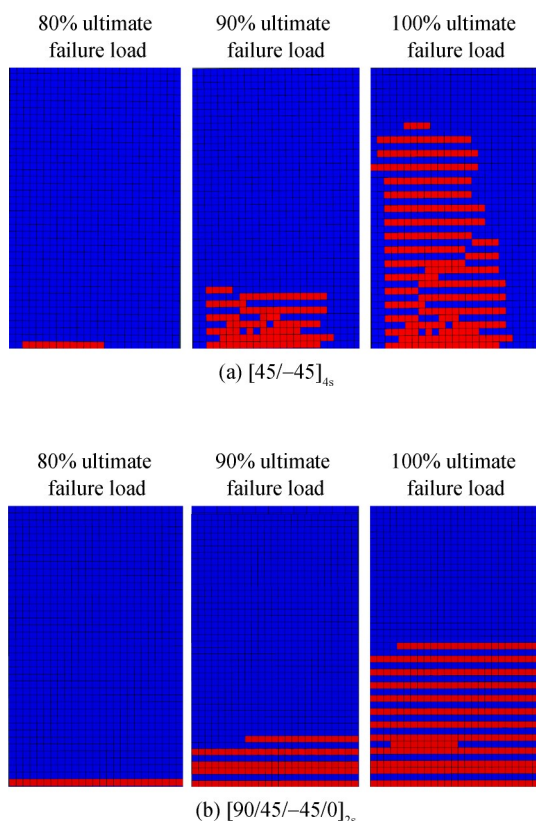


图 13 复合材料板 SDEG 图

Fig.13 SDEG of composite material board

图,随着载荷增加,首先胶接接头的复合材料端左右两个边角第一层纤维出现轻微刚度退化。载荷增加到 90% 时,第一层纤维刚度退化出现轻微扩展,但整体完整性较好。当载荷到达 100% 时,胶接接头突然断裂,使第一层纤维中间部位出现较大面积的刚度退化。

将图 11 与图 13 结合分析,发现 $[45/-45]_{4s}$ 的第一层纤维刚度退化面积最大,能够承受的极限载荷最小,与之相反, $[0/90]_{4s}$ 的第一层纤维刚度退化面积最小,能够承受的极限载荷最大。进一步说明 0° 铺层占比增加提高接头胶接强度,从而提高胶接接头力学性能。此外,碳纤维复合材料铺层均匀可以使其破坏过程更为均匀,有利于设计时确定接头的极限载荷和破坏特征。

4 结 论

1) 随着复合材料板中 0° 铺层比例增加,胶接接头极限载荷呈现增加趋势,与之相反接头拉伸位移逐渐缩短。

2) 复合材料板铺层方式对接头应力分布有较大影响。 $[45/-45]_{4s}$ 和 $[0/90]_{4s}$ 接头均会出现明显的应力集中现象,区别在于 $[45/-45]_{4s}$ 接头一侧产生应力集中, $[0/90]_{4s}$ 接头左右两侧产生应力对称集中,而 $[90/45/-45/0]_{2s}$ 接头应力分布较为均匀。

3) 接头铺层方式与载荷方向共同影响胶接接头力学性能。当复合材料板内部各个方向纤维较为均匀时,可以有效降低接头应力集中,提高胶接性能,当载荷方向与铺层纤维方向一致时,可以有效提高接头连接强度。

4) 0° 铺层占比对第一层纤维刚度退化有较大影响,占比越高,能承受的载荷越大,刚度退化

面积越小。 $[45/-45]_{4s}$ 的第一层纤维刚度退化面积最大,能够承受极限载荷最小,与之相反, $[0/90]_{4s}$ 的第一层纤维刚度退化面积最小,能够承受的极限载荷最大。

5) 复合材料板各个方向铺层均匀可以使接头受载时应力分布均匀,提高接头不同方向的综合承载能力,适合复杂受力的结构设计。

参考文献:

- [1] 胡殿印,杨尧,郭小军,等.一种平纹编织复合材料的三维通用单胞模型[J].航空动力学报,2019,34(3):608-615.
HU Dianyin, YANG Yao, GUO Xiaojun, et al. Inter-laminar stress analysis of laminated composite fan blade dovetail[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3):608-615. (in Chinese)
- [2] BRITO C B G, SALES R C M, DONADON M V. Effects of temperature and moisture on the fracture behaviour of composite adhesive joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 100(26):102607.1-102607.11.
- [3] LIN P C, LIN J W, LI G X. Clinching process for aluminum alloy and carbon fiber-reinforced thermoplastic sheets[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1/2/3/4):529-541.
- [4] CHOWDHURY N T, WANG J, WING K C, et al. Matrix failure in composite laminates under compressive loading[J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 2016, 84:103-113.
- [5] BUDHE S, BANEJA M D, DEB S, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017, 72:30-42.
- [6] 康永强,陈勇.铺层复合材料风扇叶片榫头层间应力分析[J].航空动力学报,2020,35(2):388-396.
KANG Yongqiang CHEN Yong. Inter-laminar stress analysis of laminated composite fan blade dovetail[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2):388-396. (in Chinese)
- [7] YE J X, YAN Y, LI J, 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.
- [8] DEMIRAL M, KADIOGLU F. Failure behaviour of the adhesive layer and angle ply composite adherends in single lap joints: A numerical study[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 87:181-190.
- [9] KARA E, KURŞUN A, HABOĞLU M R, et al. Fatigue behavior of adhesively bonded glass fiber reinforced plastic composites with different overlap lengths[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2015, 229(7):1292-1299.
- [10] KISHORE A N, PRASAD N S. An experimental study of flat-joggle-flat bonded joints in composite laminates[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 35:55-58.
- [11] PURIMPAT S, JÉRÔME R, SHAHRAM A. Effect of fiber angle orientation on a laminated composite single-lap adhesive joint[J]. Advanced Composite Materials, 2013, 22(3):139-149.
- [12] NURPRASETIO I P, BUDIMAN B A, AZIZ M. Evaluation of bonding strength and fracture criterion for aluminum alloy-woven composite adhesive joint based on cohesive zone model[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 85:193-201.
- [13] LIAO L, TOSHIYUKI S, HUANG C. Numerical analysis on load-bearing capacity and damage of double scarf adhesive joints subjected to combined loadings of tension and bending[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 53:65-71.
- [14] CHOUDHURY M R, DEBNATH K. Experimental analysis of tensile and compressive failure load in single-lap adhesive joint of green composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 99:102557.1-102557.10.
- [15] SÜLÜ İ 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.
- [16] SANTOS T F, CAMPILHO R D S G. Numerical modeling of adhesively-bonded double-lap joints by the eXtended finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017, 133:1-9.
- [17] LI J, YAN Y, LIANG Z, et al. Experimental and numerical study of adhesively bonded CFRP scarf-lap joints subjected to tensile loads[J]. The Journal of Adhesion, 2016, 92(1):1-17.
- [18] 张龙,程俊,邱荣凯,等.基于三维通用单胞方法的平纹编织复合材料多尺度损伤模拟方法[J].航空动力学报,2020,35(11):2275-2283.
ZHANG Long, CHENG Jun, QIU Rongkai, et al. Multiscale damage simulation of plain weave composites based on 3D general method of cells[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 35(11):2275-2283. (in Chinese)
- [19] QIN Z, YANG K, WAN J, et al. The effects of geometrical dimensions on the failure of composite-to-composite adhesively bonded joints[J]. The Journal of Adhesion, 2020, 97(11):1-28.
- [20] SUN G Y, LIU X L, ZHENG G, et al. On fracture characteristics of adhesive joints with dissimilar materials-An experimental study using digital image correlation (DIC) technique[J]. Composite Structures, 2018, 201:1056-1075.
- [21] WEI X, WANG H, SHEN H S. A novel approach for the interfacial stress analysis of composite adhesively bonded joints[J]. Composites Science and Technology, 2019, 184:107830.1-107830.7.
- [22] DOMINGUES N R E, CAMPILHO R D S G, CARBAS R J C, et al. Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016 64:86-96.
- [23] MURAT D, FERHAT K. Failure behaviour of the adhesive layer and angle ply composite adherends in single lap joints: A numerical study[J]. International Journal of Adhesion and

- Adhesives, 2018, 87:181-190.
- [24] SATTHUMNUWONG P, ROUSSEAU J, AIVAZZADEH S. Effect of fiber angle orientation on a laminated composite single-lap adhesive joint[J]. *Advanced Composite Materials*, 2013, 22(3):139-149.
- [25] FERHAT K, MURAT D. Failure behaviour of the single lap joints of angle-ply composites under three point bending tests[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019, 34(5):1-18.
- [26] ASTM International. Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding: ASTM D 5868-01[S]. West Conshohocken, US: American Society of Testing Materials, 2016: 1-2.
- [27] HOU Y, 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.
- [28] 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)
- [29] 邹田春, 秦嘉徐, 李龙辉, 等. 钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头渐进失效分析[J]. *材料导报*, 2020, 34(20): 20143-20146.
- ZOU Tianchun, QIN Jiaxu, LI Longhui, et al. Progressive failure analysis of titanium alloy-aramid fiber composites single lap joints[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(20): 20143-20146. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)