

胶接修复对碳纤维复合材料层合板挠度的影响

张晨颖² 杨涛^{1,2} 杜宇² 侯思宇²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 为了研究胶接修复对碳纤维复合材料层合板弯曲挠度的影响, 试验设置了阶梯搭接和斜面搭接两种搭接方式, 通过三点弯曲实验和数字图像相关技术(DIC)来研究胶接接头的弯曲变形情况。结果表明, 在相同搭接长度下, 阶梯搭接试件的失效载荷和弯曲强度均低于斜面搭接试件; 试件的弯曲挠度与强度和搭接长度有关, 搭接长度越长, 弯曲强度越高, 而弯曲挠度越小。由此表明, 搭接长度越长, 胶接层合板的强度越高, 但不利于层合板的柔性变形。

关键词 弯曲, 挠度, 阶梯搭接, 斜面搭接, 数字图像技术

中图分类号: V258

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.03.014

Effect of Adhesive Repair on the Deflection of Carbon Fiber Composite Laminates

ZHANG Chenying² YANG Tao^{1,2} DU Yu² HOU Siyu²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

Abstract In order to investigate the effect of glue joint repair on the flexural deflection of carbon fibre composite laminates, tests were set up with two types of laps, step lap and diagonal lap, to investigate the flexural deflection of the glue joint by means of three-point bending experiments and digital image correlation (DIC) techniques. The results showed that the failure load and bending strength of the step-lap specimens were lower than those of the diagonal-lap specimens for the same lap length. The bending deflection of the specimens was related to the strength and lap length, with the longer the lap length, the higher the bending strength and the lower the bending deflection. This shows that the longer the lap length, the higher the strength of the glued laminate, but not conducive to the flexible deformation of the laminate.

Key words Bending, Deflection, Step lap, Bevel lap, DIC

0 引言

碳纤维复合材料质量轻、强度高的特点, 使其广泛应用于航空航天等领域, 然而这种大型结构在生产制造以及使用的过程中容易产生缺陷和损伤。因此, 胶接修复以轻质、高效的特点, 成为航空航天设计制造的关键技术, 在极大程度上减少了材料的浪费。由于接头处材料和结构的不连续性, 胶接接头恰恰成为整个构件中最薄弱的位置, 进而影响构件整体性能。目前针对胶接接头的研究多集中于强度, 包括拉伸强度、弯曲强度以及冲击强度等, 如孙

中雷等^[1]对复合材料胶接接头的拉伸强度进行有限元仿真, 罗书舟等^[2]对单搭接接头的低速冲击进行了数值模拟。

增强胶接接头强度主要包括改变胶接接头表面特性、改善胶黏剂的性质以及优化搭接结构三方面。对于复合材料板之间的粘结过程, 基板表面特性对粘结部件的粘结性能的影响较大, 所以对胶接面进行合适的表面处理以增强材料的粘接性能。如 TAKEDA 等^[3]用火焰表面处理方法对 CFRP 单搭接试件胶接接头进行处理; QUAN 等^[4]采用高功率紫外

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 天津市自然科学基金(20JCQNJC00050)

第一作者简介: 张晨颖, 1997年出生, 硕士, 研究方向为复合材料成型技术与装备。E-mail: 1844237128@qq.com

通信作者: 杨涛, 1970年出生, 教授。E-mail: yangtao@tjpu.edu.cn

光对碳纤维复合材料进行快速表面处理;刘良威^[5]和LEDESMA等^[6]研究了激光表面处理对碳纤维复合材料胶接性能的影响;YANG等^[7]研究了打磨方向和表面粗糙度对胶接接头强度的影响。通过这些表面处理,提高了接头强度和抗剪能力,进而提高了胶接接头的断裂韧性。

胶接接头的强度不仅与接头的表面特性有关,还与胶黏剂的性质有关。加入纳米颗粒可以填充胶黏剂中的气泡,使粘接更充分。KHASHABA等^[8]在环氧树脂中引入多壁碳纳米管以改善斜面式胶接接头的性能;原文慧等^[9]在胶黏剂中加入碳纳米管(CNTs),有效提升了胶合板的拉剪强度;DORIGATO等^[10]在胶黏剂中加入 Al_2O_3 纳米颗粒,提高了单搭接接头的抗剪强度和疲劳寿命。

不同的搭接结构对层合板强度的影响很大,常见的胶接结构有阶梯式搭接、斜面式搭接和单搭接等。曹双辉等^[11]研究了多级阶梯式胶接结构的疲劳损伤和寿命;余芬等^[12]对阶梯型胶接修补进行有限元模拟;WU等^[13]通过有限元模拟阶梯搭接和斜面搭接在室温和湿热条件下的损伤容限;邹田春等^[14]研究了异种材料间搭接长度对胶接接头性能的影响;DURMUS等^[15]研究了不同步长的单搭接接头、一步搭接接头和三步搭接接头在拉伸载荷作用下的力学性能;ZHANG等^[16]研究温度和搭接长度对搭接接头压剪性能的影响,得到胶接层剪切应力随接头搭接长度的变化规律;郭霞等^[17]研究了搭接长度对复合材料单搭接胶接接头的影响,当搭接长度大于20 mm时,应力值变化减小,同时具有一定的承载能力,极限载荷均值随搭接长度提升。

在飞机飞行过程中,机翼受气动载荷的作用产生较大弯曲变形,从而对外翼的正常工作造成影响,所以在保证胶接强度的同时,还要考虑对弯曲挠度的影响。目前,对于搭接接头强度的研究较多,而关于胶接修复后层合板弯曲变形的研究较少,本文通过三点弯曲实验和DIC高频拍摄,研究阶梯搭接和斜面搭接两种接头类型在不同载荷下的弯曲挠度,得到不同接头类型和搭接长度对挠度的影响,并进一步分析胶接接头的应变情况。

1 实验设计

1.1 试件制备

试件采用T300碳纤维增强树脂基预浸料制备,材料的密度为 1.76 g/cm^3 ,碳纤维直径为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 。层合板采用 $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ 的铺层方式,采用热压罐方式固化成型,成型后层合板的厚度为2 mm。按照三点弯标准试件尺寸采用水射流切割试件,保证最终粘接好的试件尺寸为 $90\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,将裁剪好的试件

加工成阶梯状和斜面状结构。

为获得较好的胶接强度,用细砂纸打磨表面并用清水冲洗1~2 min,在丙酮中浸泡10 min进行脱脂处理,最后用蒸馏水清洗,烘干待用。

实验采用Araldite 2015的双组分韧性环氧树脂胶黏剂,在室温环境下按1:1的体积比例充分混合进行粘接。胶黏剂的初始固化时间为4 h,24 h后达到最佳胶接强度。胶接后用游标卡尺测量胶接处厚度和原试件厚度,使厚度之差保持在0.1 mm内,最大程度恢复层合板的外形。阶梯式和斜面式胶接层合板的胶接接头示意图如图1所示。

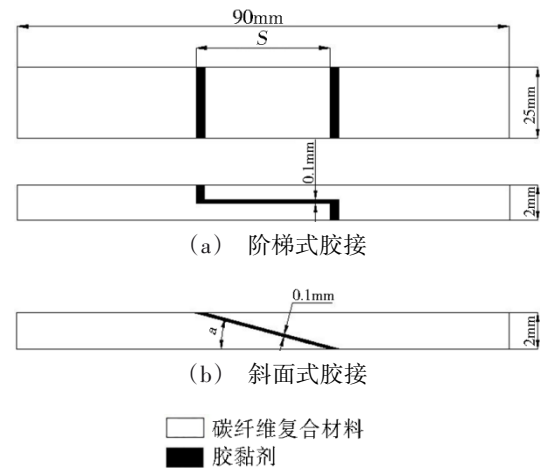


图1 阶梯式胶接和斜面式胶接接头模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stepped and bevelled glue joint models

在保证搭接长度小于跨距且具有一定承载能力的前提下,实验采用 $S=20、30、40、50\text{ mm}$ 4种搭接长度。为保证斜面搭接长度与阶梯搭接长度一致,各搭接长度对应的修补斜度为1:10、1:15、1:20、1:25,实验设置完好试件与胶接试件做对照。试件共分为9组,每组4个试件,参数如表1所示。

表1 试件编号与参数
Tab. 1 Specimen number and parameters

| 试件编号 | 接头类型 | 搭接长度/mm | 修补斜度 |
|------|------|---------|------|
| W | 完好 | - | - |
| J-1 | 阶梯搭接 | 20 | - |
| J-2 | 阶梯搭接 | 30 | - |
| J-3 | 阶梯搭接 | 40 | - |
| J-4 | 阶梯搭接 | 50 | - |
| X-1 | 斜面搭接 | 20 | 1:10 |
| X-2 | 斜面搭接 | 30 | 1:15 |
| X-3 | 斜面搭接 | 40 | 1:20 |
| X-4 | 斜面搭接 | 50 | 1:25 |

1.2 试验条件及测试方法

试件采用简支梁三点弯曲的方法测试弯曲强度,根据国际测试标准 ASTM D 790M,试件的尺寸取 90 mm×25 mm×2 mm,跨厚比取 32:1。采用日本岛津的 AGS-X-50kND 型万能试验机进行匀速加载,加载速度为 2 mm/min,跨距为 64 mm,实验装置见图 2。

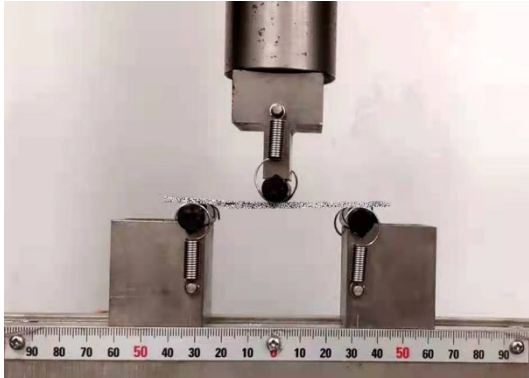


图 2 三点弯试验装置图

Fig. 2 Three point bending test device diagram

试件的弯曲挠度采用数字图像相关检测与分析系统(Digital Image Correction, 简称 DIC)对胶接件搭接区域应变场进行采集与分析。试件的侧面喷涂白色底漆,并制作黑色散斑,白色与黑色面积比约为 1:1;图像采集频率为 1 帧/s,试验设备如图 3 所示。

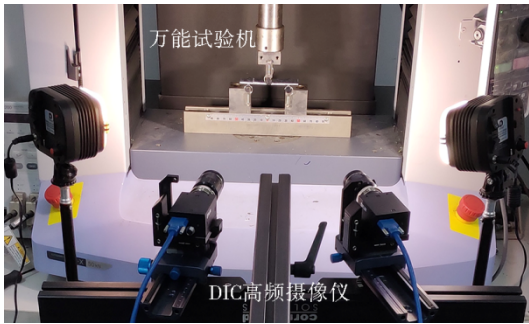


图 3 层合板弯曲试验与应变采集设备

Fig. 3 Bending test and strain acquisition equipment for laminated plates

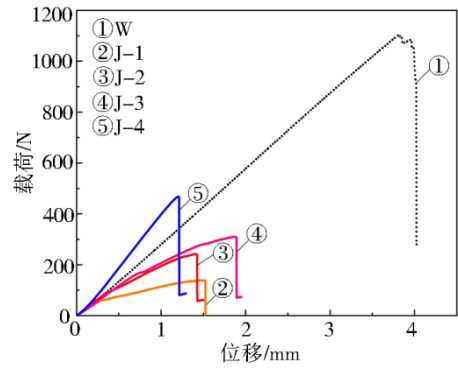
2 试验结果与分析

2.1 弯曲试验结果分析

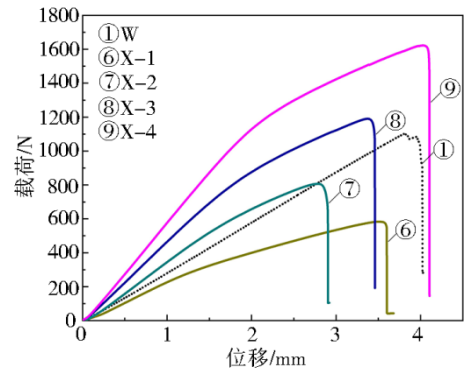
图 4 为不同搭接长度的阶梯式搭接和斜面式搭接三点弯曲载荷时的典型载荷-位移曲线,可以看出随着搭接长度的增加,两种胶接接头的弯曲失效载荷均呈增长趋势;对比可见阶梯搭接的弯曲失效载荷均小于完好试件,斜面搭接的弯曲失效载荷较大,且斜面搭接的弯曲失效载荷整体均大于阶梯搭接,在搭接 40、50 mm 时,失效载荷大于完好试件。

试件的三点弯曲强度计算公式为:

$$\sigma_y = \frac{3p_{max}l}{2bt^2}$$



(a) 阶梯搭接



(b) 斜面搭接

图 4 不同搭接长度下的典型载荷-位移曲线

Fig. 4 Typical load displacement curves under different lap lengths

式中, σ_y 为弯曲强度; p_{max} 为最大弯曲载荷; l 为跨距; b 为试件宽度; t 为试件厚度。

表 2 为完好试件、阶梯搭接和斜面搭接试件的失效载荷、弯曲强度值及修补效率。其中,完好试件的弯曲强度为 1 017.01 MPa。在两种搭接方式下,试件的弯曲强度均随搭接长度的增大而增大,阶梯搭接试件的整体弯曲强度较低,在搭接 50 mm 时的弯

表 2 不同搭接长度下试件的失效载荷、弯曲强度及修补效率

Tab. 2 Failure load, bending strength and repair efficiency of specimens with different lap lengths

| 试件编号 | 失效载荷/N | 弯曲强度/MPa | 修补效率/% |
|------|---------|----------|--------|
| W | 1059.38 | 1017.01 | - |
| J-1 | 117.06 | 112.38 | 11.05 |
| J-2 | 227.24 | 218.15 | 21.45 |
| J-3 | 276.69 | 265.62 | 26.12 |
| J-4 | 385.05 | 369.65 | 36.35 |
| X-1 | 522.03 | 501.15 | 49.28 |
| X-2 | 757.31 | 727.01 | 71.49 |
| X-3 | 1074.93 | 1031.93 | 101.47 |
| X-4 | 1382.96 | 1327.64 | 130.54 |

曲强度最高,为 369.65 MPa;斜面搭接试件的弯曲强度增长趋势明显,在斜面搭接长度分别为 40、50 mm 时,弯曲强度分别为 1 031.93、1 327.64 MPa,均高于完好试件。因此,斜面搭接的修补效率要高于阶梯搭接,斜面搭接长度为 40、50 mm 时,其修补效率达到 101.47% 和 130.54%,二者承载弯曲载荷的能力超过完好试件。

2.2 弯曲挠度结果分析

胶接接头的力学性能分为两个阶段,第一阶段为弹性变形阶段,第二阶段为断裂失效阶段,本文的

弯曲挠度均在弹性变形阶段进行测量分析。图 5 为不同阶梯搭接长度在载荷为 30、50、70、90 N 下与完好试件的挠度趋势对比。可以看出,在载荷较小为 30 N 时,搭接长度为 20 mm 时的挠度更接近于完好试件,随着载荷增加,由于搭接长度为 20 mm 的强度太小,导致搭接接头发生破坏,挠度迅速变大。当载荷为 90 N 时,搭接长度为 40 mm 的挠度更接近于完好试件,搭接长度为 50 mm 的弯曲挠度始终小于完好试件。表 3 为阶梯搭接试件和完好试件在同一载荷下的最大挠度值。

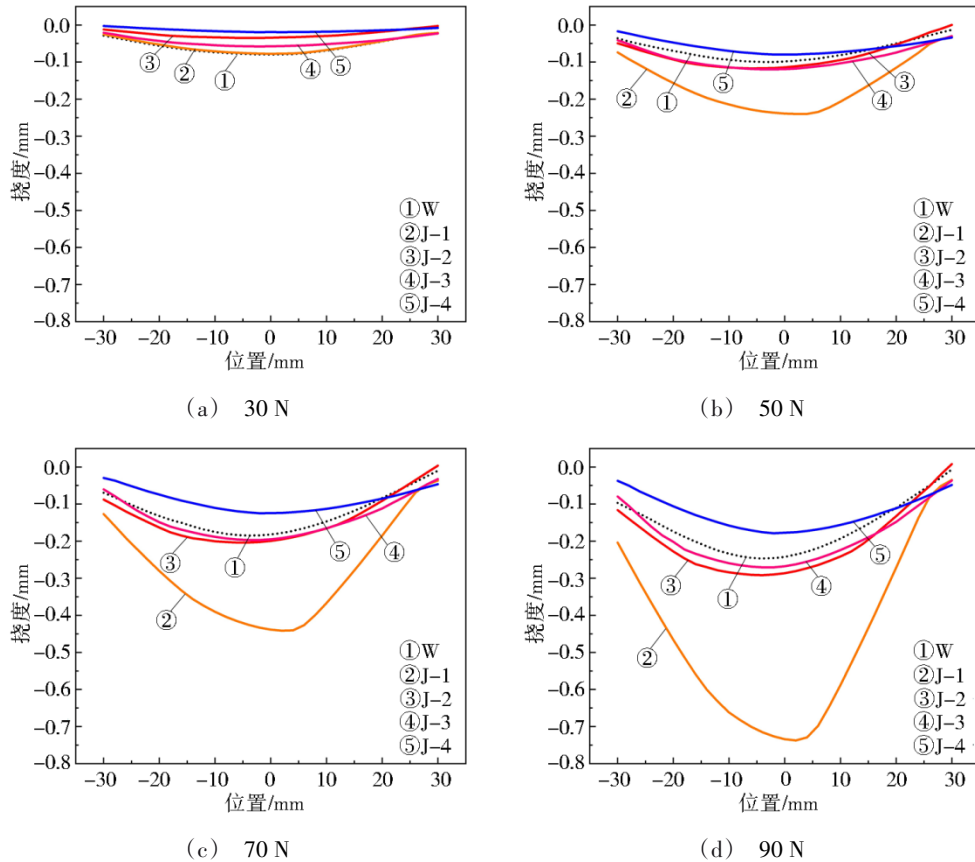


图 5 不同长度的阶梯搭接试件在同一载荷下的挠度曲线

Fig. 5 Deflection curve of different length stepped lap specimens under the same load

表 3 阶梯搭接试件与完好试件在同一载荷下的最大挠度值
Tab. 3 Maximum deflection value of step lap test piece and intact test piece under the same load

| 试件 编号 | 最大挠度值/mm | | | |
|----------|----------|---------|---------|---------|
| | 30 N | 50 N | 70 N | 90 N |
| W | 0.07966 | 0.09994 | 0.18533 | 0.24701 |
| J-1 | 0.07965 | 0.23979 | 0.44146 | 0.73717 |
| J-2 | 0.03493 | 0.11710 | 0.20401 | 0.29167 |
| J-3 | 0.05789 | 0.11984 | 0.19711 | 0.27086 |
| J-4 | 0.01959 | 0.07990 | 0.12498 | 0.17872 |

图 6 为不同斜面搭接长度的试件在载荷为 100、200、300、400 N 下与完好试件的挠度趋势对比。从

图 6(a)中可以看出,当载荷为 100 N 时,斜面搭接试件的挠度均小于完好试件,故当载荷低于 100 N 时,斜面搭接试件的挠度必然小于完好试件,因此斜面搭接试件的挠度仅在 100 ~ 400 N 内进行分析。可以看出,挠度随着搭接长度的增大而减小;斜面搭接长度为 30、40、50 mm 的试件在 100 ~ 400 N 的载荷下,挠度始终小于完好试件,说明搭接长度对于试件的弯曲挠度影响较大,不利于试件的柔性弯曲;而搭接长度为 20 mm 的试件,由于其强度较小,强度对挠度的影响大于搭接长度的影响,当载荷不断增加时,其挠度比完好试件大。表 4 为斜面搭接试件和完好试件在同一载荷下的最大挠度值。

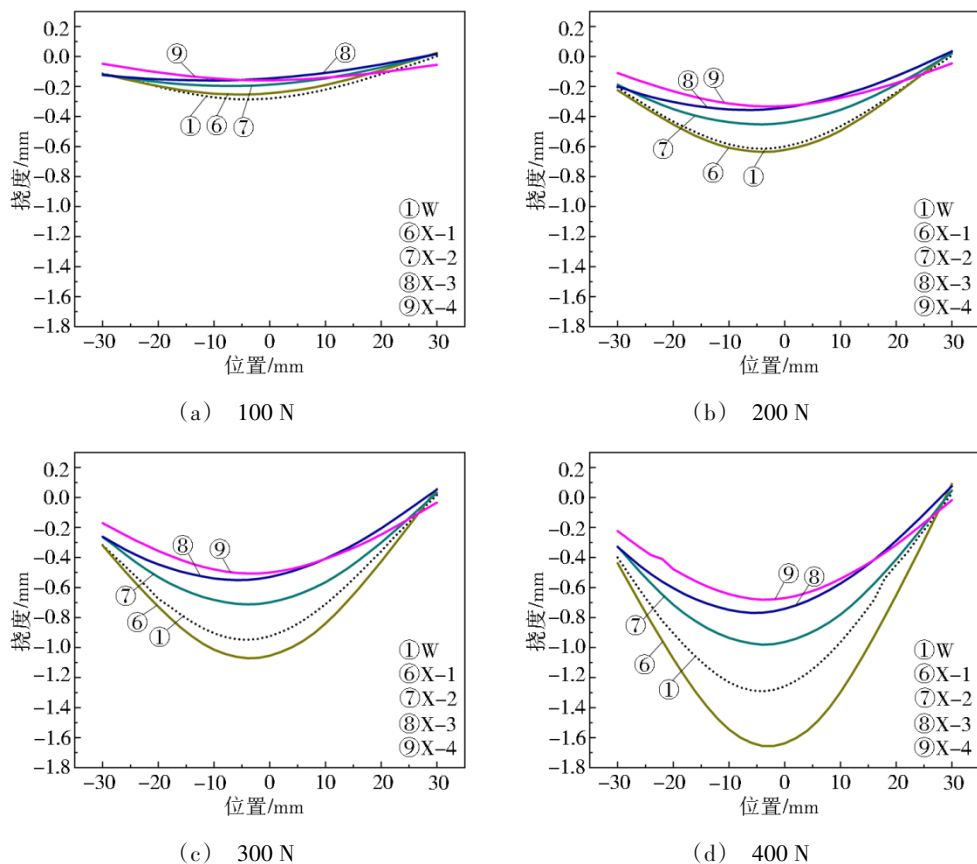


图6 不同长度的斜面搭接试件在同一载荷下的挠度曲线

Fig. 6 Deflection curves of different lengths of inclined lap specimens under the same load

表4 斜面搭接试件与完好试件在同一载荷下的最大挠度值
Tab. 4 Maximum deflection values of inclined lap joint specimen and intact specimen under the same load

| 试件 编号 | 最大挠度值/mm | | | |
|----------|----------|---------|---------|---------|
| | 100 N | 200 N | 300 N | 400 N |
| W | 0.28640 | 0.61484 | 0.94870 | 1.29141 |
| X-1 | 0.25373 | 0.63669 | 1.07170 | 1.65627 |
| X-2 | 0.19696 | 0.45303 | 0.71268 | 0.98052 |
| X-3 | 0.16033 | 0.35689 | 0.55117 | 0.76897 |
| X-4 | 0.15938 | 0.33324 | 0.50712 | 0.68091 |

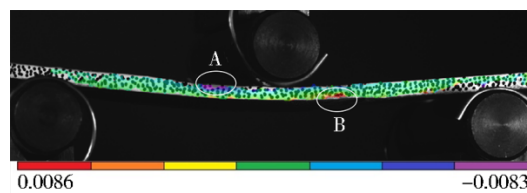
通过观察同一载荷下不同搭接长度的挠度曲线,可见搭接长度越长越不利于碳纤维层合板的弯曲挠度;对比两种不同搭接形式随载荷增加的挠度变化趋势可以看出强度对挠度的影响,强度越低,层合板的弯曲挠度越大。所以在保证强度的同时,尽量选取较短的搭接长度,以保证层合板的柔性弯曲。

2.3 DIC分析

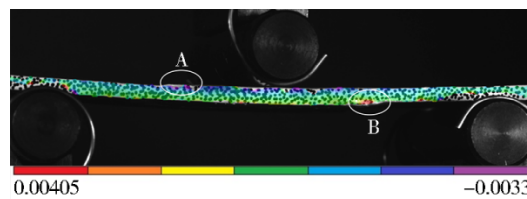
在施加压力的过程中,胶接接头处受到剪切应力和剥离应力的影响,在胶接接头区域内的应变较为复杂,本文仅对斜面搭接试件的侧表面进行应变分析。图7为4种搭接长度的斜面搭接试件在400 N时的x方向应变云图,可以看出在局部压力的作用下,胶接区域的应变值从上到下呈由负到正的变化趋势。层合板的上表面被压缩,应变值为负,尤其在

上表面的接头A处产生最大负应变;层合板的下表面被拉伸,应变值为正,在下表面接头B处有最大正应变。当搭接长度增大时,层合板的应变值的变化范围随之减小,接头处的应变不再集中分布,原因是搭接长度越长,增大了胶接面积,胶接接头处的承载能力提高,避免了应力集中,接头的剪切应力减小。

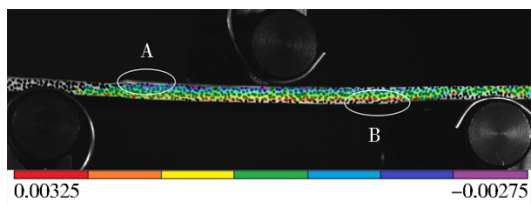
图8为4种长度的斜面搭接试件在400 N时的y方向应变云图,可以看出y方向的整体应变并不明显,应变主要集中在C处,由于搭接长度为20、30 mm的试件的接头处恰与C处应变位置重合,接头处更容易受到剥离应力的影响。



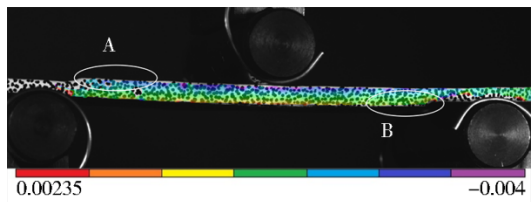
(a) X-1



(b) X-2



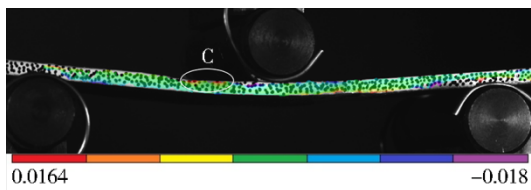
(c) X-3



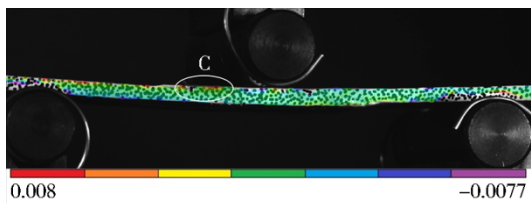
(d) X-4

图7 4种斜面搭接长度在400 N下的 x 方向应变云图

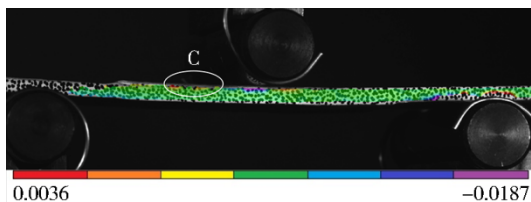
Fig. 7 x -Direction strain nephogram of four kinds of inclined plane lap length at 400 N



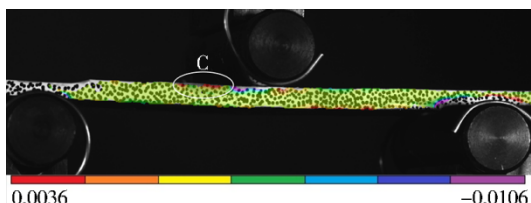
(a) X-1



(b) X-2



(c) X-3



(d) X-4

图8 4种斜面搭接长度在400 N下的 y 方向应变云图

Fig. 8 y -Direction strain nephogram of four kinds of inclined plane lap length at 400 N

3 结论

(1)对4种不同搭接长度的阶梯搭接和斜面搭接

试件进行弯曲试验,阶梯搭接试件最大弯曲强度为369.65 MPa,斜面搭接试件最大弯曲强度为1327.64 MPa,实验结果表明随着搭接长度的增加,两种形式下的搭接试件的最大弯曲强度均明显增大,且斜面搭接试件的最大弯曲强度明显大于阶梯搭接试件,当斜面搭接长度为40和50 mm时,最大弯曲强度大于完好试件,弯曲效率为101.47%和130.54%。

(2)通过对比四种搭接长度的阶梯搭接和斜面搭接在同一载荷下的挠度曲线,阶梯搭接长度为20 mm的试件在30 N的较小载荷下的弯曲挠度更接近于完好试件,搭接长度为50 mm的试件的弯曲挠度始终小于完好试件;斜面搭接长度为20 mm的试件在100和200 N的载荷下,挠度与完好试件相似,当载荷继续增大时,挠度也随之增大,并超过完好试件,而搭接长度为30、40和50 mm的试件的弯曲挠度在100~400 N的载荷下始终小于完好试件,实验结果表明,搭接长度越长,挠度越小,越不利于层合板的柔性弯曲。

(3)当搭接长度较短时,层合板在 x 方向和 y 方向应变值均集中于胶接接头处,随着搭接长度的增大,接头处的应变不再集中分布,且应变值的变化范围逐渐减小。实验结果表明,搭接长度越长,改善了应力集中现象,但应变值的变化范围减小,不利于胶接接头的柔性弯曲。

参考文献

- [1] 孙中雷,张国凡. 复合材料胶接接头强度设计研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(03):46-50.
SUN Zhong Lei, ZHANG Guo Fan. Study on strength design of composite adhesive joint [J]. Computer Simulation, 2017, 34(03): 46-50.
- [2] 罗书舟,陈超,伍乾坤,等. 复合材料单搭接胶接接头低速冲击数值模拟[J]. 振动与冲击, 2019, 38(01):142-148,186.
LUO Shu Zhou, CHEN Chao, WU Qian Kun, et al. Numerical simulation of low velocity impact of composite single lap adhesive joint[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(01): 142-148,186.
- [3] TAKEDA T, YASUOKA T, HOSHI H, et al. Effectiveness of flame-based surface treatment for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 119(02): 30-37.
- [4] QUAN D, DEEGAN B, BYRNE L, et al. Rapid surface activation of carbon fibre reinforced PEEK and PPS composites by high-power UV-irradiation for the adhesive
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第3期

joining of dissimilar materials[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 137(5): <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105976>.

[5] 刘良威,胡晶晶,刘锦,等. 准分子激光表面处理对CFRP胶接强度的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(04): 45-49.

LIU Liang Wei, HU Jing Jing, LIU Jin, et al. Effect of excimer laser surface treatment on bonding strength of CFRP[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2019, 49(04): 45-49.

[6] LEDESMA R I, PALMIERI F L, LIN Y, et al. Picosecond laser surface treatment and analysis of thermoplastic composites for structural adhesive bonding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191(3): <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107939>.

[7] YANG G X, YANG T, YUAN W H, et al. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160(2): 446-456.

[8] KHASHABA U A, ALJINAIDI A A, HAMED M A, et al. Analysis of adhesively bonded CFRE composite scarf joints modified with MWCNTs [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 71(2): 59-71.

[10] DORIGATO A, PEGORETTI A. The role of alumina nanoparticles in epoxy adhesives [J]. *Nanoparticle Research*, 2011, 13(6): 2429 - 2441.

[11] 曹双辉,高弄玥,刘斌. 飞机复合材料阶梯式胶接结构的疲劳损伤与寿命[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(02): 81-84,96.

CAO Shuang Hui, GAO Nong Yue, LIU Bin. Fatigue damage and life of aircraft composite stepped bonding structure [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020 (02) : 81-84,96.

[12] 余芬,郭拓,刘武帅,等. 复合材料层合板阶梯型胶接修补斜度有限元数值模拟研究[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(04):99-108.

YU Fen, GUO Tuo, LIU Wu Shuai, et al. Finite element numerical simulation of repair slope of composite laminates with stepped bonding [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(04): 99-108.

[13] WU C, CHEN C, HE L, et al. Comparison on damage tolerance of scarf and stepped-lap bonded composite joints under quasi-static loading [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 155(6): 19-30.

[14] 邹田春,秦嘉徐,李龙辉,等. 搭接长度对钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头胶接性能的影响[J]. *中国塑料*, 2020, 34(01):17-21.

ZOU Tian Chun, QIN Jia Xu, LI Long Hui, et al. Effect of lap length on bonding properties of single lap joints of titanium alloy aramid fiber composites [J]. *China Plastics*, 2020, 34(01): 17-21.

[15] DURMUS M, AKPINAR S. The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three-step-lap joints with different step lengths [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 105(1): <https://doi.org/101016/j.tafmec.2019.102427>.

[16] ZHANG Y F, ZHOU Z G, TAN Z Y. Compression shear properties of adhesively bonded single-lap joints of C/C composite materials at high temperatures [J]. *Symmetry*, 2019, 11(12):10.3390/sym11121437.

[17] 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(07):37-41.

GUO Xia, GUAN Zhi Dong, LIU Sui, et al. Effect of lap length on single lap adhesive joint of composite [J]. *Science and Technology Review*, 2013, 31(07): 37-41.