

采用电阻加热工艺的复合材料二次胶接接头的拉伸剪切性能

王 轩^{1*} 姚凯飞¹ 原伟强¹ 王魁奎² 于吉选² 张 毅³

1.中国民航大学航空工程学院,天津,300300

2.航空工业济南特种结构研究所民机中心,山东济南,250023

3.天津爱思达航天科技有限公司,天津,300304

摘要:通过试验研究了5种嵌入物对热固性复合材料二次胶接接头拉伸剪切性能的影响。试验结果显示:金属网嵌入物须进行表面处理才能提高胶接质量;电阻加热工艺制备的接头拉剪强度优于热压罐工艺;嵌入物可提高接头的拉伸剪切性能,碳纤维预浸料嵌入物的接头拉伸剪切性能最好;镍网嵌入物致密度高,对应的胶接质量优于铜网嵌入物;接头搭接区域端部存在严重的应力集中;金属网嵌入物提高了接头拉伸刚度;嵌入物接头呈现内聚破坏、黏附破坏、被胶接件纤维撕裂破坏、嵌入物破坏,剥离应力在破坏中起主要作用;断面破坏模式分布区域越不规则,胶接质量越差。

关键词:电阻加热;二次胶接;复合材料;拉伸剪切性能

中图分类号:V258

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tensile-shear Property of Composite Secondary Bonding Joints with Resistance Heating Technology

WANG Xuan^{1*} YAO Kaifei¹ YUAN Weiqiang¹ WANG Kuikui² YU Jixuan² ZHANG Yi³

1.College of Aeronautical Engineering,Civil Aviation University of China,Tianjin,300300

2.Center of Civil Aircraft Product,Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites,AVIC,Jinan,250023

3.Tianjin Istar space Technology Co.,Ltd.,Tianjin,300304

Abstract: The impacts of 5 embeddings on tensile-shear properties of the secondary bonding joints were analyzed. The experimental results indicate that to improve the quality of the joints, the embedded metal mesh might undergo surface treatment. Tensile-shear strength of the joints by resistance heating technology is better than that by autoclave technology. The additions of embedded material enhanced the tensile shear properties of the joints, and the joints with prepreg embedding demonstrate the best tensile-shear strength. Nickel mesh embeddings exhibit higher densities, and have better bonding quality than that of copper mesh. End regions of the overlap joint experience severe stress concentration. Metal mesh embeddings enhance joint tensile stiffness. The joints with embeddings exhibit cohesive failure, adhesive failure, fiber tearing fracture of bonded parts and embedding failure, and the peeling stress is a major factor in failure. The more irregular distribution of failure modes is in the failure section, the poorer bonding quality is.

Key words: resistive heating; secondary bonding; composite material; tensile-shear property

0 引言

复合材料二次胶接因其工艺通用、零件定位简单、易实施、可在结构集成的后期实施等优点^[1-3]而在航空航天结构连接中得到广泛使用。热压罐工艺具有罐内温度和压力均匀等优点,可保证胶接接头质量稳定,因此在工程中常作为复合材料二次胶接的实施工艺,但该工艺存在固化周期长、能耗高、加热效率低,以及构件表面存在

难以避免的温度梯度等问题^[4-7]。

电阻加热工艺是一种能耗低、效率高、操作简单且胶接面温度场非常均匀的二次胶接固化方法。该工艺的原理是将材料作为电阻元件嵌入胶黏剂中,利用电阻元件的焦耳热对周围胶黏剂进行加热固化。该工艺已在热塑性复合材料焊接中得到广泛应用^[8-13],但在热固性复合材料二次胶接中的应用研究还不充分。

ASHRAFI等^[14]将碳纤维织物作为加热源嵌入胶接面,实现接头粘接固化,接头力学性能与

烘箱和热压罐固化相近。SMITH 等^[15]研究了真空袋加压与机械加压对电阻加热胶接接头性能的影响,发现不同加压方式对孔隙率和拉伸性能影响不大。上述研究并未充分对比分析不同嵌入材料对接头力学性能的影响,这限制了电阻加热工艺在热固性复合材料二次胶接中的应用。

热塑性复合材料二次胶接采用铜网和镍网^[10]作为嵌入物加热材料,因此笔者将 5 种导电材料(两种不同规格的铜网、两种不同规格的镍网、碳纤维预浸料)作为嵌入物,采用电阻加热工艺制备碳纤维/环氧树脂复合材料二次胶接单搭接接头试验件,并开展拉剪载荷试验,研究嵌入物表面处理、嵌入物材料对试验件拉剪性能的影响。

1 试验设计

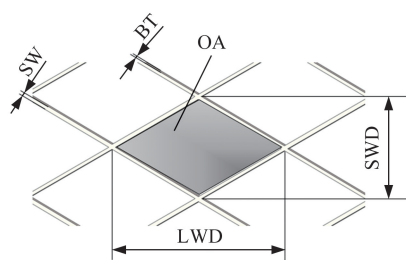
1.1 试验件材料

本文研究的复合材料二次胶接接头由胶接件采用真空袋加压、电热毯加热工艺制备。原材料为天津汉硕高新材料有限公司的 T700 级碳纤维/环氧树脂单向带预浸料,牌号为 TU/SYT49S-130。铺层方式为 $[90^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ]_{2s}$,铺层数目为 16,固化后的层合板厚度为 2 mm。固化工艺:先以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从室温升温至 125°C 并保温 120 min,再以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降至室温,全程外加真空压力 0.1 MPa。二次胶接采用的胶黏剂为哈尔滨精鑫科技有限公司的 X3117 中温固化胶膜(厚度为 0.2 mm)。

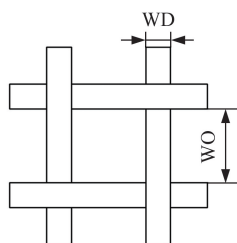
实验使用 5 种导电材料的电阻加热元件。图 1a 所示为铜网几何尺寸及实物,具有长节距(long way of the diamond, LWD)、短节距(short way of the diamond, SWD)、厚度(base thickness, BT)、金属线宽度(strand width, SW)及开孔面积(open area, OA)5 个几何特征参数。图 1b 所示为镍网几何尺寸及实物,具有金属丝直径(wire diameter, WD)、网孔宽度(width of opening, WO)及厚度 3 个几何特征参数。图 1c 为碳纤维预浸料实物图,预浸料嵌入物与被胶接件原材料一致,纤维方向为拉伸载荷加载方向。上述三种嵌入物的具体规格如表 1~表 3 所示。

1.2 试验件制备

图 2、图 3 分别为电阻加热工艺温度控制原理图与装置布置图。为将电流引入嵌入物,用铜板充当电极,再用电线连接嵌入物与电极。将温度控制器、热电偶、固态继电器与直流电源相连,通过热电偶的温度反馈进行 PID 控制。电阻加热二次胶接采用真空袋加压,二次胶接过程中被



(a) 铜网



(b) 镍网



(c) 碳纤维预浸料

图 1 嵌入物几何参数及实物图

Fig.1 The geometric parameters and physical image of embeddings

表 1 铜网规格

Tab.1 The specifications of copper mesh

| 编号 | 金属线宽度/mm | 厚度/mm | 长节距/mm | 开孔率/% |
|-----|----------|-------|--------|-------|
| C79 | 0.16 | 0.076 | 3.175 | 79 |
| C70 | 0.12 | 0.076 | 2.540 | 70 |

注:C79 表示开孔率为 79% 的铜网,C70 表示开孔率为 70% 的铜网,开孔率为开孔面积占金属网总面积的百分比。

表 2 镍网规格

Tab.2 The specifications of nickel mesh

| 编号 | 金属丝直径/mm | 网孔宽度/mm | 厚度/mm | 材料 |
|------|----------|---------|-------|----|
| N120 | 0.06 | 0.15 | 0.12 | N6 |
| N150 | 0.06 | 0.1 | 0.12 | N6 |

注:N120 表示 120 目的镍网,N150 表示 150 目的镍网。

表 3 T700 级碳纤维预浸料规格

Tab.3 The specification of T700 grade carbon fiber prepreg

| 编号 | 纤维面密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) | 树脂含量/% | 厚度/mm |
|-----|--|--------|-------|
| Pre | 130 | 33 | 0.125 |

胶接件、胶黏剂、辅助材料的放置如图 4 所示,在嵌入物上下两侧各铺贴一层胶膜,避免嵌入物与被胶接件接触。

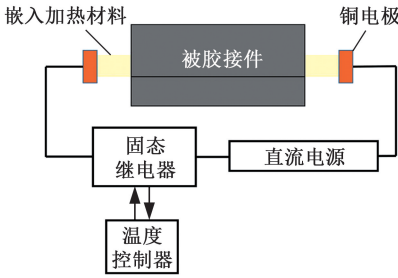


图 2 电阻加热控制原理图

Fig.2 The schematic diagram of resistance heating control

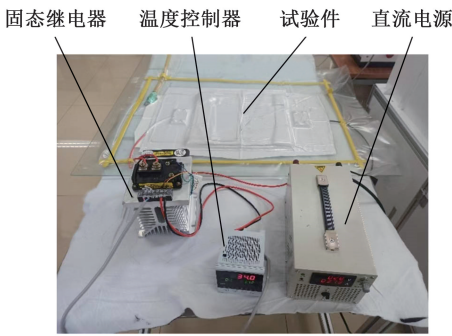


图 3 电阻加热工艺装置布置图

Fig.3 The device arrangement of resistance heating

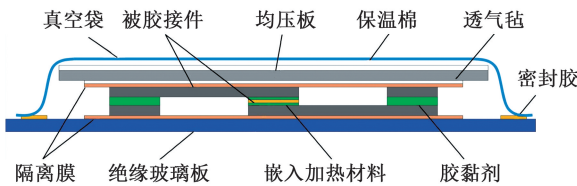


图 4 真空袋电阻加热工艺示意图

Fig.4 The sketch of vacuum bag resistance heating technology

5 种材料的加热方式相同,此处仅以铜网加热为例来说明即将二次胶接工艺固化温度曲线分为 3 个阶段:第一阶段为升温阶段,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从室温升温至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$;第二阶段为保温阶段,在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h ;第三阶段为降温阶段,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至室温。3 个阶段均使用真空泵施加 0.1 MPa 的固化压力。图 5 所示为嵌入铜网电阻加热的固化工艺曲线,可见 PID 控制的胶接面处的热电偶温度曲线与预设温度曲线重合度较好,证明笔者搭建的电阻加热固化平台能实现胶接面固化温度的精准控制。

根据标准 ASTM D5868-01 设计了不同嵌入物电阻加热固化的单搭接接头试验件,试验件几何尺寸如图 6 所示。为避免在胶接固化过程中出现二次弯曲效应,在试验件两端粘接与固化区域尺寸相同的加强片。胶接固化前,对胶接表面进

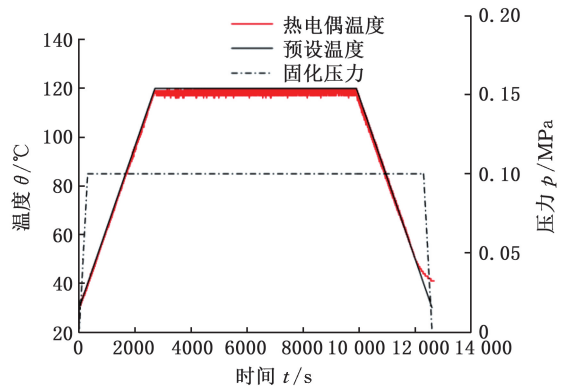


图 5 嵌入铜网电阻加热固化工艺曲线

Fig.5 Curing curves of resistance heating technology with embedded copper mesh

行处理,即采用 180 目氧化铝砂纸沿拉伸方向打磨胶接区域,并用酒精去除胶接表面的氧化层与油污,保证胶接面无污染。胶接面表面处理,分别采用电阻加热工艺与热压罐工艺制备单搭接接头试验件,拉伸剪切试验类别如表 4 所示,其中, C79-2 试验件主要用来考察嵌入物表面处理对拉剪强度的影响。对 C79-2 试验件外的金属网嵌入物表面进行硅烷化处理。硅烷偶联剂成份 KH550、去离子水、无水乙醇的体积比为 $1:3:6$,硅烷偶联剂的 pH 值为 4。硅烷偶联剂水解 5 h 后,先将金属网浸泡入硅烷水解液 $3\sim 5\text{ min}$,再取出吹干即可在金属网表面获得一定厚度的硅烷预处理涂层。

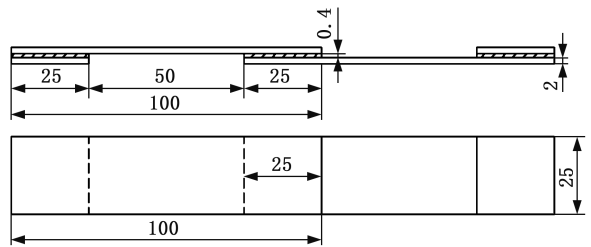


图 6 试验件几何尺寸

Fig.6 The geometric dimensions of the test pieces

表 4 拉伸剪切试验类别

Tab.4 The tensile-shear test category

| 固化方式 | 固化压力 p/MPa | 固化温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$ | 嵌入物规格 | 嵌入物表面处理 | 试验件数目 | 试验件编号 |
|--------|---------------------|--------------------------------|-------|---------|-------|-----------|
| 热压罐工艺 | 0.3 | 120 | | | 5 | Autoclave |
| 电阻加热工艺 | 0.1 | 120 | C70 | 是 | 5 | C70 |
| | 0.1 | 120 | C79 | 是 | 5 | C79-1 |
| | 0.1 | 120 | C79 | 否 | 5 | C79-2 |
| | 0.1 | 120 | N120 | 是 | 5 | N120 |
| | 0.1 | 120 | N150 | 是 | 5 | N150 |
| | 0.1 | 120 | Pre | 是 | 5 | Pre |

1.3 试验方法

参考标准 ASTM D5868-01,在室温下使用

Instron 5982 电子万能材料试验机测试试验件的拉剪强度,设置拉伸速率为 13mm/min,利用 DIC (digital image correlation) 系统测量试验件正面和侧面的应变分布,图 7 所示为试验装置,图 8 所示为喷有 DIC 测量专用散斑的试验件。

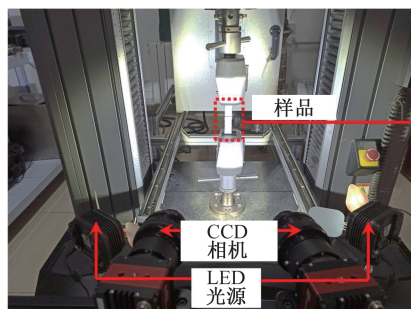
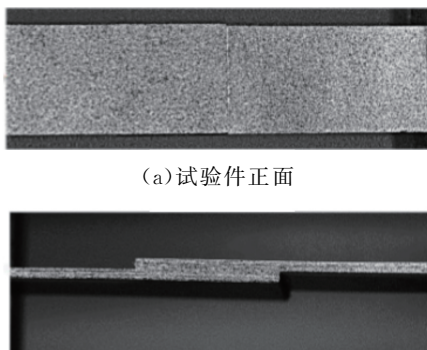


图 7 试验装置
Fig.7 The test setup



(a) 试验件正面
(b) 试验件侧面
图 8 喷有散斑的试验件
Fig.8 The test piece sprayed with scattered spots

2 结果与分析

2.1 嵌入物表面处理的影响

仅以嵌入铜网电阻加热制备的二次胶接接头试验件来研究表面处理对接头力学性能的影响。表面硅烷化处理的铜网实验件 C79-1、表面未作任何处理的铜网实验件 C79-2 的载荷-位移曲线如图 9 所示。

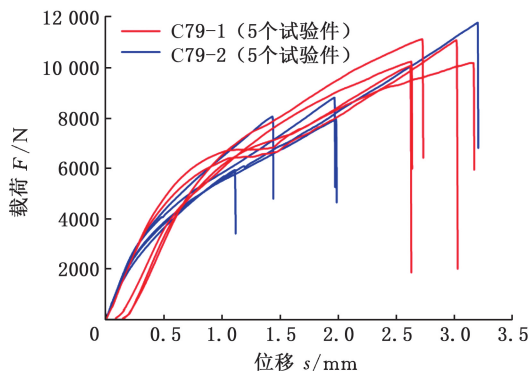


图 9 铜网试验件的载荷-位移曲线
Fig.9 The load-displacement curves of the test pieces with copper mesh

由图 9 和表 5 可知,相比于经过表面处理的试验件,未经表面处理的试验件变异系数增大近 5 倍,平均破坏载荷下降近 20%,甚至低于热压罐工艺二次胶接试验件。可见,硅烷偶联剂表面处理能大大提高胶接接头的质量稳定性。金属网嵌入物务必在固化前进行表面处理,否则胶接质量不可控、胶接强度不满足要求。

表 5 拉剪试验结果

Tab.5 The results of the tensile-shear tests

| 编号 | 平均破坏载荷 F/N | 变异系数/% |
|-----------|--------------|--------|
| Autoclave | 9995 | 9.2 |
| C79-1 | 10 550 | 5.0 |
| C79-2 | 8510 | 24.9 |
| C70 | 10 909 | 8.0 |
| N120 | 14 330 | 6.1 |
| N150 | 11 443 | 11.2 |
| Pre | 14 998 | 5.1 |

2.2 拉剪强度

如表 5 所示,与热压罐工艺制备的试验件相比,嵌入铜网的 C79-1、C70 试验件的平均破坏载荷分别提高 5.55% 和 9.14%;嵌入镍网的 N120、N150 试验件的平均破坏载荷分别提高 43.37% 与 26.71%;嵌入碳纤维预浸料的 Pre 试验件平均破坏载荷提高 50.05%。可见,相比于热压罐工艺,电阻加热工艺均提高了接头拉剪强度。

嵌入物使胶接面加热时的温度均匀性大大改善,克服了热压罐工艺的胶接面温度梯度问题,胶接质量提高。相较于金属嵌入物,预浸料与胶黏剂的浸润性最好,界面性能最好,致密度最高,电阻加热温度均匀性最好,因此胶接质量最好。相较于嵌入铜网的接头,嵌入镍网的接头致密度更高,温度更均匀,胶接质量更好。嵌入铜网的接头胶接质量随开孔率增大而减小,这是因为开孔率大时致密度低,导致温度均匀性更差。嵌入镍网的接头胶接质量随目数增大而减小,这是因为 120 目和 150 目镍网的网孔尺寸接近孔隙大小(一般小于 0.1 mm),较大目数的镍网阻碍树脂流动,导致挥发性气体、夹裹在胶膜之间的气体排出困难,对胶接质量产生不利影响。

由表 6 可知所有嵌入物均发生不同程度的破坏,这说明嵌入物参与接头载荷传递。与热压罐工艺制备的试验件相比,5 种嵌入物试验件的平均破坏载荷均增大,与表 5 所示结果一致,可见嵌入物的加入对接头产生增强作用。

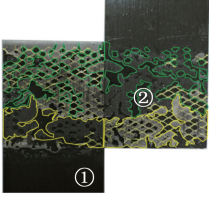
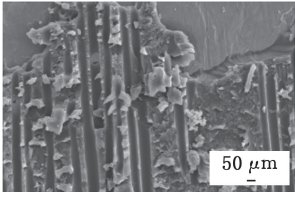
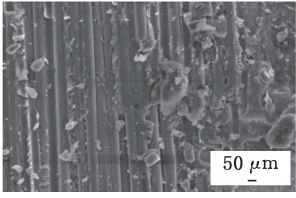
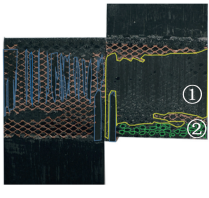
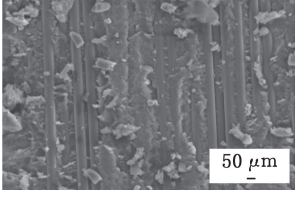
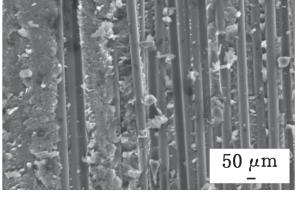
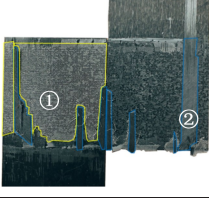
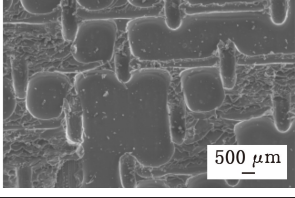
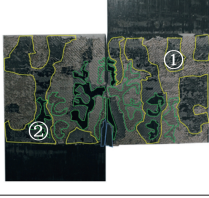
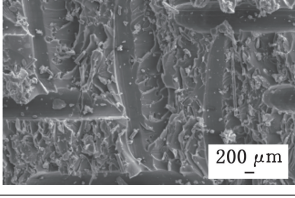
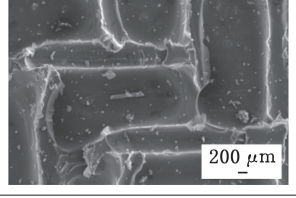
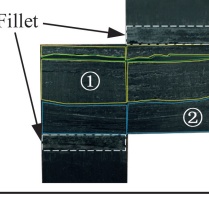
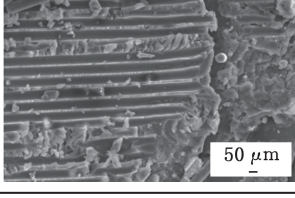
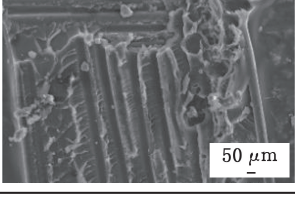
2.3 破坏模式

2.3.1 宏观破坏模式

嵌入物试验件搭接面在拉剪载荷作用下的破坏模式分别为胶层内聚破坏、黏附破坏、被胶接件纤维撕裂破坏和嵌入物破坏。表 6 给出了不同嵌

表 6 嵌入物试验件的拉剪宏观破坏模式与断面微观形貌

Tab.6 Tensile and shear macroscopic damage modes and sectional microscopic morphology of typical test specimens for various types of inserts

| 编号 | 失效模式(宏观) | 失效模式(微观) | |
|-------|---|---|--|
| | | ①区域 | ②区域 |
| C79-1 |  |  |  |
| C70 |  |  |  |
| N120 |  |  | |
| N150 |  |  |  |
| Pre |  |  |  |

人物试验件的断面形貌,其中,黄色区域表示内聚破坏,蓝色区域表示被胶接件纤维撕裂破坏,绿色区域表示黏附破坏。

由表 6 可知,嵌入物试验件均有嵌入物残留在两侧被胶接件上,即嵌入物试验件均发生了嵌入物破坏。除 C79-1 试验件外,其他试验件都出现被胶接件纤维撕裂破坏。这种破坏模式只能由剥离破坏造成,说明剥离应力在试验件破坏中起主要作用。C79-1 试验件断面两侧黏附破坏的分布区域较乱,内聚破坏区域较为集中,这说明该试验件的破坏由剥离黏附破坏和剪切内聚破坏共同主导。C70 试验件断面出现被胶接件纤维撕裂破坏,破坏区域多而随机,且内聚破坏区域较大,端部黏附破坏区域杂乱分布,所以断面区域剥离应力作用显著。N120 试验件断面大部区域呈现内聚破坏,局部呈现被胶接件纤维撕裂破坏。N150

试验件断面呈现内聚破坏和黏附破坏,但两种破坏区域混杂分布。Pre 试验件的断面中,内聚破坏和被胶接件纤维撕裂破坏分布区域较为规整。

由表 6 可以看出,不同破坏模式区域混杂分布,说明不同位置的黏附强度显著不同即胶接质量较差。若破坏模式单一且区域分布均匀,则不同位置的黏附强度接近,表明胶接质量较好。因此断面不同破坏模式分布区域越混杂,胶接质量越差。

2.3.2 断面微观形貌

利用扫描电子显微镜观察嵌入物试验件断面典型区域的微观形貌,由表 6 可知,嵌入物试验件在区域①的纤维均未排列整齐,纤维图像比较模糊,胶黏剂残留较多且杂乱无序,说明胶层内部发生内聚破坏;在 C79-1、C70 试验件的区域②可看到清晰且较规则分布的纤维,胶黏剂残留较少且零星分布,说明该区域发生黏附破坏;在 N120、

Pre 试验件的区域②可看到纤维发生不同程度的断裂,说明该区域发生被胶接件纤维撕裂破坏;在 N150 试验件的区域②可看到清晰的镍网,且胶黏剂残留很少,说明该区域发生黏附破坏。

2.4 应变分析

2.4.1 正面 DIC 分析

利用 DIC 技术在指定的时间间隔内记录试验件在加载过程中各个时刻的表面形貌数字图像,对试验件的正面应变进行分析,并选取拉剪载荷为破坏载荷 75% 时的应变云图进行对比。由图 10 可知,在拉剪载荷作用下,由于泊松效应的

影响,试验件在 X 方向上发生收缩,导致边缘区域的应变较大,同时搭接区域端部的应变也较大,与图 11 中该区域 Y 方向应变较大的结果相一致,表明该区域存在明显的应力集中。图 10、图 11 的分析结果表明,胶接区域的端部和两侧有较大的应变,而中间区域的应变相对较小,这表明端部和两侧存在显著的应力集中,中间区域的应力分布相对均匀。如图 10、图 11 所示,胶接区域外表面和端部之外的局部应变较大且随机分布,这可能是试验件制作过程中产生胶瘤等缺陷所致。

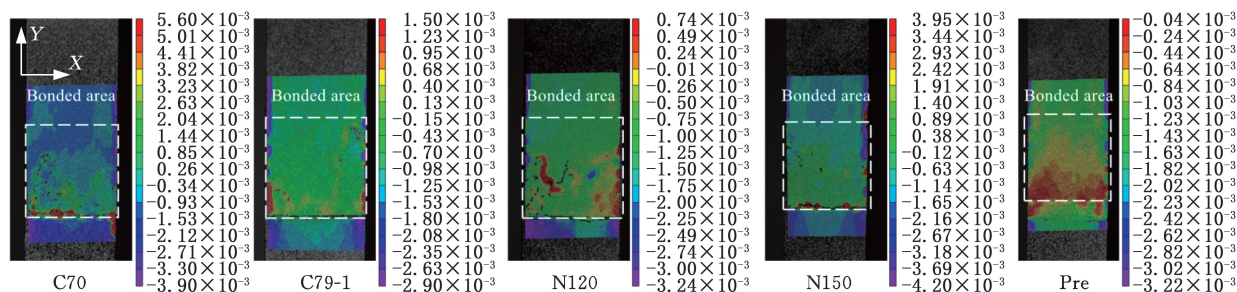


图 10 嵌入物试验件胶接区域正面 X 方向的应变云图(破坏载荷 75%)

Fig.10 The strain cloud along frontal X-direction in the bonded area of test pieces with embedding at 75% of failure load

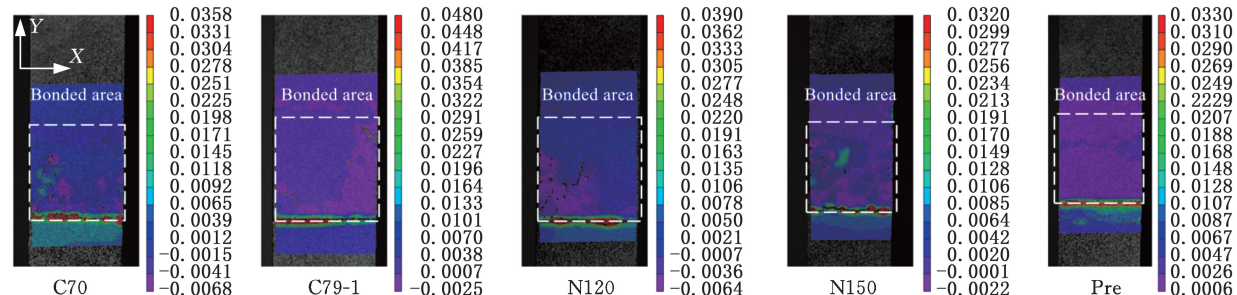


图 11 嵌入物试验件胶接区域正面 Y 方向的应变云图(破坏载荷 75%)

Fig.11 The strain cloud along frontal Y-direction in the bonded area of test pieces with embedding at 75% of failure load

2.4.2 侧面 DIC 分析

对不同破坏载荷下的试验件应变云图(图 12)进行分析。由图 12 可以看出,施加的载荷越大,偏心拉伸导致的二次弯曲效应越明显,弯曲变形越显著;搭接区域端部 X 方向和 Y 方向的应变总体上呈现逐渐增大的趋势,说明端部位置的剥离和剪切应力随载荷增加而严重。对比图 12j、图 12b、图 12d、图 12f、图 12h 可以发现,Pre 试验件 Y 方向的应变明显大于其他嵌入物试验件的相应值,这是因为预浸料嵌入物与被胶接件材料一致,两者刚度相近,变形协调性好,而嵌入金属网的接头胶层刚度与被胶接件相差较大,金属网嵌入物明显提高了试验件 Y 方向的刚度。图 12 显示,胶接区域外表面和端部之外的局部应变较大且随机分布,这可能是试验件制作过程中产生的胶瘤等缺陷所致。

3 结论

1)对金属网进行硅烷表面处理能极大提高胶接接头的质量稳定性,显著提高胶接强度和可靠性,降低试件性能的分散性。

2)相比于热压罐工艺制备的试验件,电阻加热工艺制备的嵌入物试验件具有更好的拉剪性能,嵌入物的加入对接头产生增强作用,其中,碳纤维预浸料嵌入物接头的性能最好,镍网嵌入物接头的性能次之,铜网嵌入物接头的性能最差。

3)受偏心载荷产生的二次弯曲效应的影响,接头搭接区域端部的应力集中非常显著;金属网嵌入物改变了胶层刚度,提高了接头的整体拉伸刚度。

4)嵌入物接头出现内聚破坏、黏附破坏、被胶接件纤维撕裂破坏和嵌入物破坏;剥离应力在破坏中起主要作用;断面破坏模式分布区域越不规则,胶接质量越差。

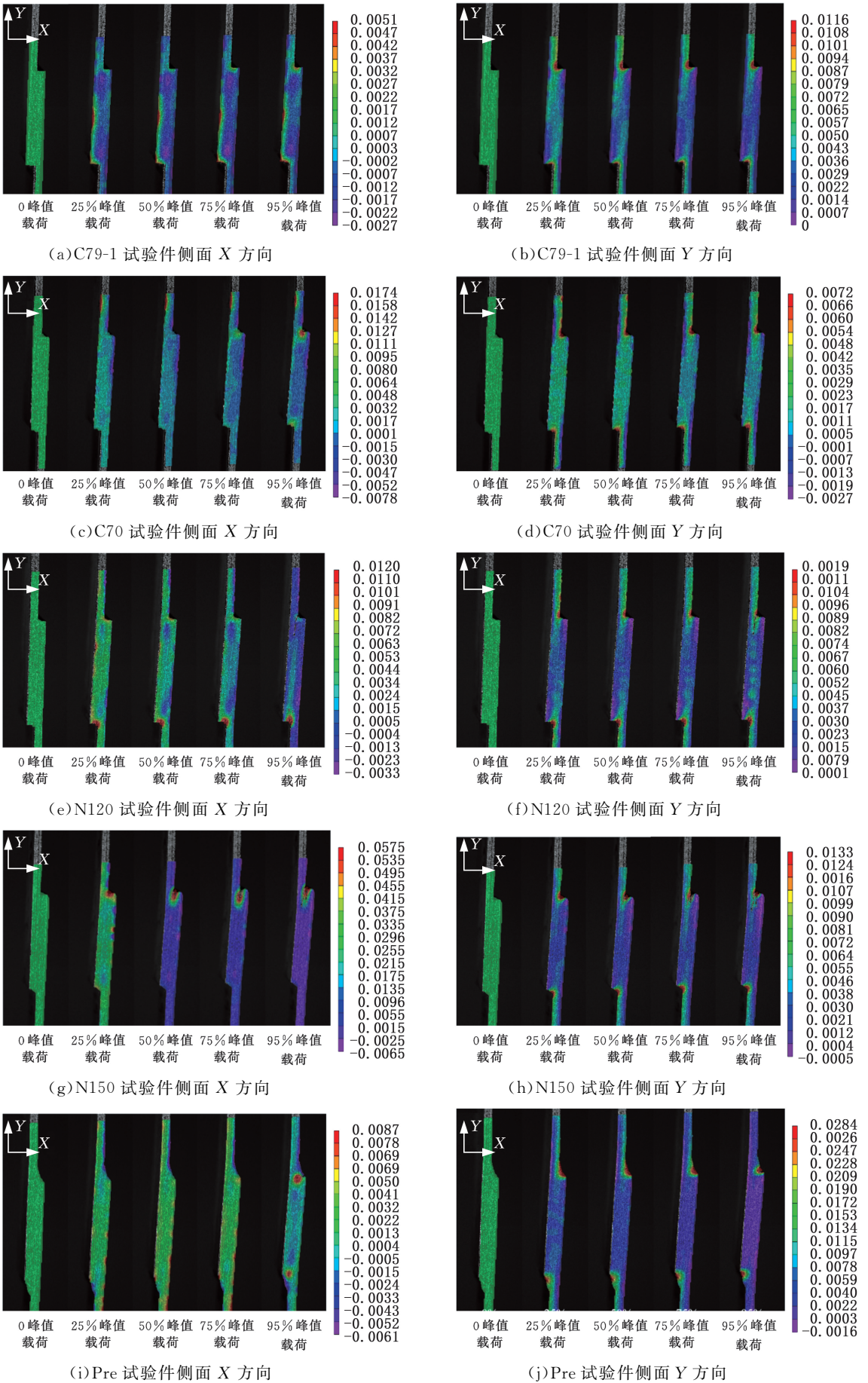


图 12 嵌入物试验件侧面的应变演化

Fig.12 The evolution of lateral strain for test pieces with embeddings

参考文献:

- [1] YUDHANTO A, ALFANO M, LUBINEAU G. Surface Preparation Strategies in Secondary Bonded Thermoset-based Composite Materials: a Review [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 147:106443.
- [2] 张新建, 吴宏亮, 陈洁, 等. 民用飞机胶接技术应用分析[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(17):46-49.
ZHANG Xinjian, WU Hongliang, CHEN Jie, et al. Survey of Adhesive Bonding Technology Development of Civil Aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(17):46-49.
- [3] 郭磊, 刘检华, 张佳朋, 等. 航天工业中胶接技术的研究现状分析[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12):1395-1405.
GUO Lei, LIU Jianhua, ZHANG Jiapeng, et al. Research Status Analysis of Adhesively Connection Technology in Aerospace Industry[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(12):1395-1405.
- [4] BOHNE T, FRERICH T, JENDRNY J, et al. Simulation and Validation of Air Flow and Heat Transfer in an Autoclave Process for Definition of Thermal Boundary Conditions during Curing of Composite Parts[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(12):1677-1687.
- [5] ANANDAN S, DHALIWAL G S, HUO Z, et al. Curing of Thick Thermoset Composite Laminates: Multiphysics Modeling and Experiments [J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25(5):1155-1168.
- [6] 李树健, 湛利华, 彭文飞, 等. 先进复合材料构件热压罐成型工艺研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(11):2927-2931.
LI Shujian, ZHAN Lihua, PENG Wenfei, et al. Research Progress of Autoclave Molding for Advanced Composite Components[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(11):2927-2931.
- [7] MIRZAEI S, KRISHNAN K, AL KOBTAWY C, et al. Heat Transfer Simulation and Improvement of Autoclave Loading in Composites Manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(11):2989-3000.
- [8] REIS J P, de MOURA M, SAMBORSKI S. Thermoplastic Composites and Their Promising Applications in Joining and Repair Composites Structures: a Review [J]. *Materials*, 2020, 13(24):5832.
- [9] 熊需海, 王道晟, 任荣, 等. 碳纳米管对热固性复合材料电阻焊接的增强作用[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5):54-61.
XIONG Xuhai, WANG Daosheng, REN Rong, et al. Enhancement of Thermosetting Composites Resistance Welding by Carbon Nanotubes [J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(5):54-61.
- [10] 美国 CMH-17 协调委员会. 复合材料手册第 3 卷: 聚合物基复合材料——材料应用、设计和分析 [M]. 丁惠梁, 石定社, 童贤鑫, 等译. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
CMH-17 Coordinating Committee. *Composites Handbook Volume 3: Polymer Matrix Composites I Material Applications, Design, and Analysis* [M]. Translated by DING Huiliang, SHI Dingshe, TONG Xianxin, et al. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.
- [11] ROHART V, LABERGE LEBEL L, DUBÉ M. Improved Adhesion between Stainless Steel Heating Element and PPS Polymer in Resistance Welding of Thermoplastic Composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 188:107876.
- [12] 杨爽, 王静, 杨帅, 等. 电阻焊接技术在复合材料领域应用进展[J]. *冶金与材料*, 2021, 41(5):127-128.
YANG Shuang, WANG Jing, YANG Shuai, et al. Application Progress of Resistance Welding Technology in Composite Material Field [J]. *Metallurgy and Materials*, 2021, 41(5):127-128.
- [13] ZHAO Gang, CHEN Tongzhou, XIA Xiwen, et al. Resistance Welding of Thermoplastic Composites with Nanofiber Films Prepared by Electrospinning Technique [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 251:110473.
- [14] ASHRAFI M, DEVASIA S, TUTTLE M E. Resistive Embedded Heating for Homogeneous Curing of Adhesively Bonded Joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 57:34-39.
- [15] SMITH B, TUTTLE M, DEVASIA S. Investigation of Embedded Resistive Heating for High Strength Adhesive Bonding of Modular Space Structures [C] // AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition; AIAA SPACE Forum. Orlando, 2017:56571430.

(编辑 张 洋)

作者简介: 王 轩*, 男, 1982 年生, 博士研究生。研究方向为复合材料。发表论文 25 篇。E-mail: xuanwangaero2022@163.com。

本文引用格式:

王轩, 姚凯飞, 原伟强, 等. 采用电阻加热工艺的复合材料二次胶接接头的拉伸剪切性能[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(1):152-159.
WANG Xuan, YAO Kaifei, YUAN Weiqiang, et al. Tensile-shear Property of Composite Secondary Bonding Joints with Resistance Heating Technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(1):152-159.