

可剥布对 T300/Cycom 970 环氧树脂复合材料 胶接性能的影响

刘宇婷^{1,2}, 潘利剑^{*2}, 胡秀凤², 朱世根¹, 刘卫平²

(1. 东华大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620)

摘要: 在商用飞机复合材料结构制造过程中, 可剥布在复合材料共胶接和二次胶接的表面处理过程中应用越来越广泛, 逐步替代传统打磨方式。然而在实际应用中, 可剥布与复合材料树脂体系之间存在一定的匹配性, 经不同可剥布处理后的复合材料表面胶接性能存在较大差异。为研究其对胶接性能的影响, 选用四种航空用可剥布对复合材料进行表面处理, 采用热压罐工艺制备 T300/Cycom 970 环氧复合材料层压板, 选取同一种航空用胶膜进行胶接。按照 ASTM 剥离测试和单搭接剪切测试标准, 对 T300/Cycom 970 环氧复合材料胶接结构的性能进行测试, 采用接触角测试、SEM 和 X 射线能谱测试 (XPS) 分别对复合材料层压板制件和可剥布织物的表面润湿性、表面形貌和表面元素进行测试与分析。结果表明: 选用聚酯湿可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料胶接性能最佳; 可剥布织物及涂层的残留会影响复合材料胶接性能; 可剥布处理能改善复合材料表面润湿性, 提高表面能, 但并不能保障胶接质量; 可剥布编织形式直接影响复合材料表面形貌, 决定其表面粗糙度, 对复合材料胶接性能也有较大的影响。

关键词: 复合材料; 可剥布; 胶接质量; 表面处理; 表面特性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)05-0996-07

Effect of peel plies on bonding properties of T300/Cycom 970 epoxy composites

LIU Yuting^{1,2}, PAN Lijian^{*2}, HU Xiufeng², ZHU Shigen¹, LIU Weiping²

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In the manufacturing process of composite structures for commercial aircraft, peel ply surface treatment for co-bonding and secondary bonding of composites is becoming more common and gradually substitutes the traditional method such as grinding. And it is found that potential matching exists between different peel plies and composite resin systems in practical application. As a result, varied bonding properties were observed on composite surface with different peel plies after treatments. In order to study the effects of peel ply on the bonding performance, T300/Cycom 970 epoxy resin composite laminates were fabricated using the autoclave process. First, four peel plies and an adhesive film for commercial aircraft were chosen for surface treatment and bonding, respectively. Second, the structure properties of T300/Cycom 970 epoxy laminate specimens after bonding were tested by stripping tests and single lap shear tests according to the ASTM standards. Finally, contact angle test, scanning electron microscopy (SEM) and X-Ray Photo Spectroscopy (XPS) were applied to characterize the surface wettability, morphology and element analysis for composite laminates and peel plies. The results show that the bond quality of the T300/Cycom 970 epoxy composite sample which are treated with polyester wet peel ply is the best, and the residual of peel

收稿日期: 2016-05-31; 录用日期: 2016-09-01; 网络出版时间: 2016-09-06 16:28

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160906.1628.006.html

基金项目: 青年教师科研启动基金(281070053016); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC14-JS-15-049); 上海市科委 2014 年度“科技创新行动计划”高新技术领域项目子课题(14DZ11000402)

通讯作者: 潘利剑, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为树脂基复合材料、复合材料结构分析和复合材料液体成型工艺
E-mail: xiaopanhrb@163.com

引用格式: 刘宇婷, 潘利剑, 胡秀凤, 等. 可剥布对 T300/Cycom 970 环氧复合材料胶接性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 996-1002.

LIU Y T, PAN L J, HU X F, et al. Effect of peel plies on bonding properties of T300/Cycom 970 epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 996-1002 (in Chinese).

plies fabric and coating has negative effect on the T300/Cycom 970 epoxy composite bonding performance. Although peel ply surface treatment can improve the surface wettability and the surface energy, the improvement of wettability cannot guarantee the bond quality. T300/Cycom 970 epoxy composite surface topography and roughness are affected directly by peel ply weave pattern, which produce an effect on the bond quality of the composites.

Keywords: composites; peel ply; bond quality; surface treatment; surface performance

随着复合材料在航空领域中的大量使用^[1], 复合材料构件常常需要与其他材料连接, 最常用连接方法是机械连接和胶接。传统的机械连接容易造成纤维断裂, 导致整体结构强度减弱, 结构重量增加^[2]; 胶接是胶黏剂和被黏结的表面通过物理或化学作用相互连接, 这种连接技术避免了机械连接需要打孔引起的材料损坏, 并且可以减轻结构重量, 使部件型面平整光滑, 改善疲劳强度^[3]。然而胶接质量与复合材料的表面活性和表面粗糙度有极大的关系, 为获得较好的胶接质量, 在胶接前需要对复合材料进行表面处理。传统的表面处理方式有打磨或喷砂处理^[4-5], 这些处理方式虽然易操作, 但表面状况不易检测, 很难确保获得良好的胶接质量。为寻求更好的表面处理方法, 近年来, 一些国外研究人员选择在制备复合材料层压板时, 在预浸料叠层板表面铺覆一层可剥布材料来达到表面处理的效果。

可剥布是一种有机高分子材料(一般为聚酯或聚酰胺)的纤维织物, 在碳纤维/环氧树脂复合材料成型前将其铺覆在预浸料叠层板表面, 成型后从制件表面剥离这层可剥布, 得到具有一定粗糙度和活性的复合材料胶接表面^[6]。可剥布可分为干可剥布和湿可剥布两类, 其主要区别在于湿可剥布为含有树脂的织物, 而干可剥布只是一层织物。然而, 在实际应用中, 不同可剥布处理的复合材料表面表现出不同的胶接质量, 可剥布与预浸料之间存在一种特殊的匹配性。本文采用不同航空用可剥布处理 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面, 通过 SEM、接触角测试、X 射线能谱分析测试(XPS)对不同可剥布处理后的复合材料表面进行表面形貌、表面能和表面元素的分析, 同时选用航空用胶膜进行共固化胶接, 按照 ASTM 标准进行单搭接测试和剥离测试, 根据测试结果, 分析可剥布对胶接质量的影响因素, 为航空复合材料结构件的胶接提供相关的理论依据。

1 实验材料及方法

实验采用 T300 碳纤维平纹编织/Cycom 970 环氧树脂预浸料, 固化温度 180℃, 压力 600 kPa, 固化时间 120 min。胶膜为 PL 7000, 四种可剥布

编号为 P1、P2、P3、P4, 具体参数见表 1。热压罐工艺所需的辅助材料有: 真空袋、隔离膜和透气毡。脱模剂, 二碘甲烷、丙三醇、乙二醇、甲酰胺和丙酮, 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司。

表 1 实验选用可剥布材料

Table1 The peel plies chosen in the experiment

Peel ply	State	Component	Coated
P1	Wet	Polyester	—
P2	Dry	Polyester	—
P3	Dry	Nylon	—
P4	Dry	Nylon	Silicone

采用热压罐成型工艺共制备六组复合材料层压板, 其中四组为在预浸料叠层板表面分别铺贴四种不同型号的可剥布, 剩余两组铺贴隔离膜作为打磨组以及空白对照组。铺贴完成的试板按照预浸料固化参数进行固化, 得到 T300/Cycom 970 环氧复合材料层压板。

打磨组利用砂纸打磨, 然后用丙酮擦洗烘干, 空白组仅采用丙酮擦洗烘干, 可剥布处理的复合材料层压板在胶接前揭除可剥布, 然后用 PL7000 胶膜进行胶接, 所采用的工艺参数与预浸料固化相同。可剥布处理 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面及其共胶接过程如图 1 所示。

按照 ASTM D5868—01^[7] 和 ASTM D3807—98^[8] 测试标准分别加工单搭接剪切和剥离测试样, 然后使用万能力学试验机进行相关测试。采用 SEM 分别对可剥布织物、可剥布处理后的复合

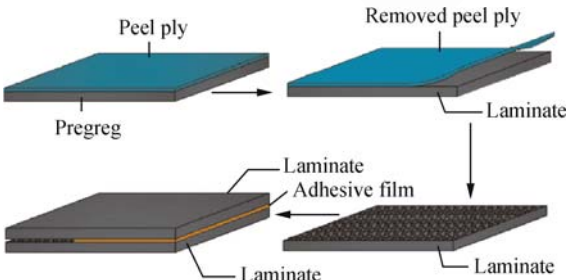


图 1 可剥布处理 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面并制备胶接试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of peel plies treatment T300/Cycom 970 epoxy composite surface and bonding samples preparing

材料表面以及去除的可剥布表面形貌进行观察。利用 XPS 对可剥布处理后的复合材料表面化学成分进行分析。通过接触角测试检测可剥布处理后的复合材料表面润湿性,接触角试剂选用去离子水、二碘甲烷和乙二醇,通过 LW-AB 法计算表面能值^[9]。

2 结果与讨论

2.1 不同可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧力学性能

图 2 为不同可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料单搭接剪切强度和剥离强度。可知,经过表面处理的复合材料胶接性能高于未经处理的复合材料胶接性能,说明使用可剥布或打磨对复合材料表面进行处理可以有效地改善胶接质量。四种可剥布处理后的复合材料试验件的单搭接剪切强度和剥离强度存在明显差异性,P1、P2 两种聚酯可剥布处理后的复合材料胶接性能高于打磨处理后的胶

接试验件胶接性,而 P3、P4 两种尼龙可剥布处理的复合材料胶接性能低于打磨处理胶接试验件的胶接性能,说明聚酯可剥布处理能达到打磨处理的效果,而尼龙可剥布处理比打磨处理效果差,且 P1 湿可剥布处理后复合材料胶接性能最佳,P4 带涂层的尼龙可剥布处理后的复合材料表面胶接性能最差。因此,选用合适的可剥布进行表面处理,完全可以替代传统的打磨方式,达到相同的表面处理效果。

图 3 为 T300/Cycom 970 环氧复合材料力学性能测试后其胶接面破坏后的照片。观察胶膜残留面及试样的破坏模式发现:只有经打磨与 P1 处理后的复合材料胶接破坏模式满足航空要求的内聚破坏模式,内聚破坏即胶接接头在受力过程中胶接区域发生破坏的一种失效形式;P2 处理后的复合材料胶接表现为混合破坏,即碳纤维层的断裂;P3 处理后

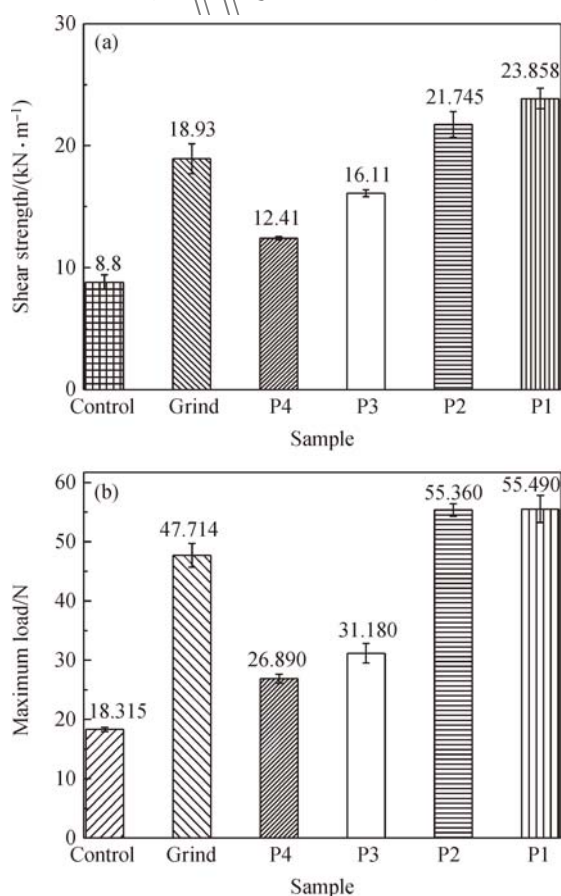


图 2 不同可剥布处理的 T300/Cycom 970 环氧复合材料单搭接剪切强度和最大剥离载荷

Fig. 2 Single lap shear strength and stripping maximum load contrast of T300/Cycom 970 epoxy composite with different peel plies surface treatment

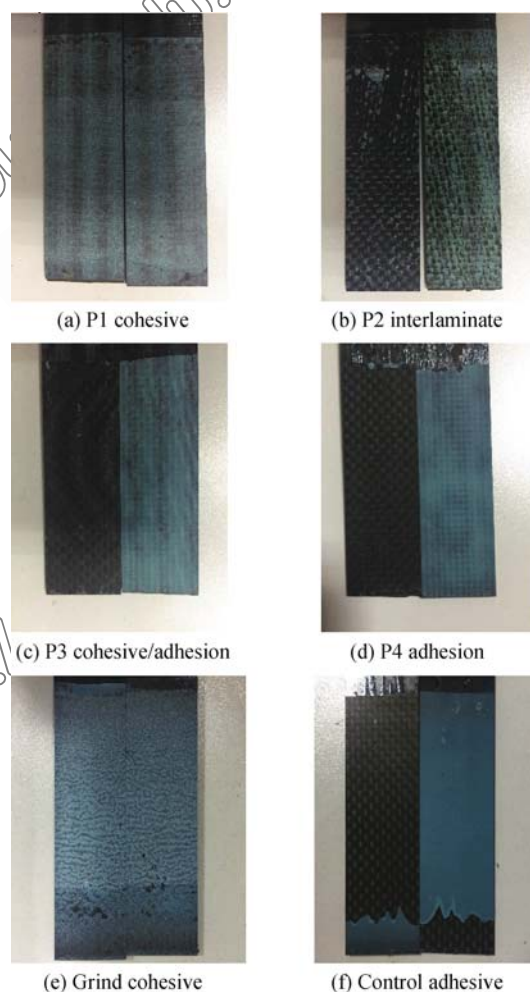


图 3 T300/Cycom 970 环氧复合材料胶接样件的力学性能测试断面形貌

Fig. 3 Section morphology on adhesive side of mechanical property tests of T300/Cycom 970 epoxy composite bonding specimens

胶接面大部分表现为界面破坏,但在局部区域存在内聚破坏,内聚破坏的存在使其胶接性能与 P4 相比有略微的提高;P4 处理后的复合材料和空白组均表现为界面破坏,即胶膜出现脱黏情况。内聚破坏被认为其界面作用力足够大,为理想的破坏形式,而黏附破坏为胶黏剂与被黏体在界面结合处脱开而使接头失去承载能力的破坏形式,难以完全发挥被黏体和胶黏剂材料的力学性能,影响胶接接头品质。混合破坏介于两者之间,可能随着条件的变化发生转变,因此,混合破坏和黏附破坏均不符合要求。

2.2 可剥布织物及 T300/Cycom 970 环氧的表面形貌

图 4 为四种可剥布织物的 SEM 图像。图 4(a) 为溶解表面树脂层后的 P1 湿聚酯可剥布织物,表面纯净,没有明显杂质。图 4(c) 为 P3 尼龙织物,织物表面存在较多的残留物质,在图中椭圆标记处,这些是织物本身制造过程中的杂质。图 4(d) 为 P4 含硅酮涂层尼龙织物,表面纯净。图 4(b) 为 P2 聚酯织物,表面存在少量杂质,但和其他三种织物相比,其编织比较紧密。P1、P3、P4 三种织物松散的编织使织物经纬交叉处存在一定空隙,导致树脂在此处富余,当发生断裂时,此处会发生树脂间的断裂^[10],提高剥离或剪切强度,而 P4 表面涂层和 P3 表面的杂质可能会残留在复合材

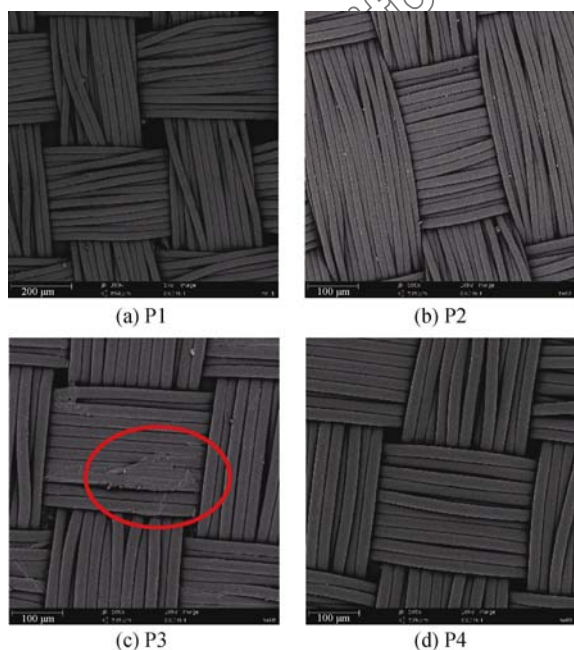


图 4 四种可剥布织物的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of peel-ply fabrics used in this study

料表面影响胶接质量,因此,需要进一步观察可剥布揭除后,复合材料表面是否存在杂质或可剥布残留。

图 5 为可剥布从 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面揭除后碳纤维复合材料表面和接触复合材料面的可剥布的表面 SEM 图像。可见,各复合材料表面均具有明显的编织纹路,且与对应的可剥布编织形

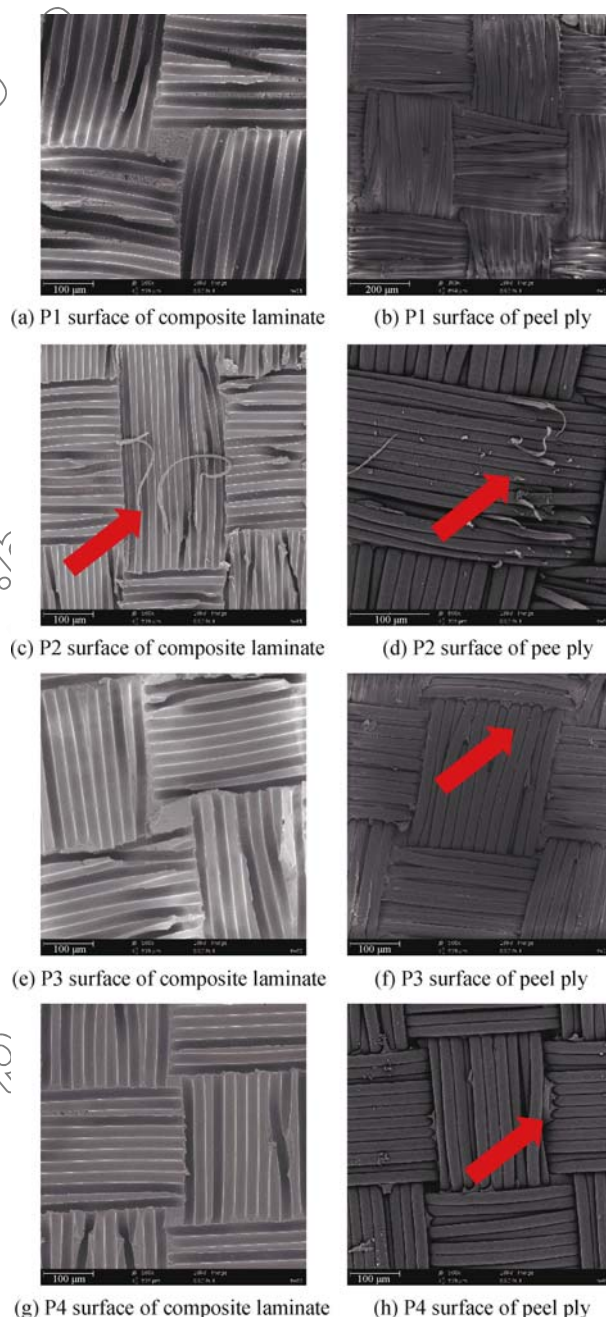


图 5 可剥布揭除后 T300/Cycom 970 环氧复合材料处理表面和接触复合材料的可剥布表面 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of T300/Cycom 970 epoxy composite surfaces after removal of peel plies and peel plies after removal from cured laminate

貌一致,说明可剥布织物的编织形式直接决定复合材料表面形貌,可剥布的表面纹理会直接复制到复合材料表面上,增加复合材料的表面粗糙度和接触面积,有利于复合材料的胶接。而粗糙度过大时,表面的凹凸程度较为明显,凹凸处会储存较多的水分和空气,产生气泡,降低胶接强度^[11-12]。即可剥布织物的编织形式会影响复合材料胶接表面^[13]。

比较两种聚酯可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面, P2 聚酯可剥布处理的复合材料表面有一定的可剥布丝束残留,对应的可剥布表面也观察到撕裂的织物形貌,如图 5(c)和图 5(d)箭头所示。说明聚酯织物在揭除时发生断裂、卷曲,使一部分聚酯纤维残留在复合材料表面,可能导致其胶接性能降低^[14]; P1 聚酯可剥布处理的复合材料表面观察不到明显的可剥布丝束残留。P3 和 P4 尼龙可剥布在可剥布表面可观察到大量纤维被树脂包覆,以及锯齿状裂纹,如图 5(f)和图 5(h)箭头所示。除此无明显可剥布织物残留。P1、P3 和 P4 处理的复合材料表面,可剥布经纬织物编织空隙对应的复合材料表面存在一定的树脂积聚,产生树脂富集区域。

结合图 5 及前文中力学性能分析, P3 和 P4 尼龙可剥布处理的复合材料表面胶接质量较差,但复合材料表面观察不到明显的物质残留,需进一步通过 XPS 元素分析,验证是否存在不利于胶接的残留。

2.3 未经处理与可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧表面元素

对不同可剥布处理及未经处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面进行 XPS 元素分析,发现不同复合材料表面均存在 C、O、N、Si 四种元素,不同复合材料表面化学组成如表 2 所示。可见,所有样品表面的 C 元素含量均最高,其主要来源于环氧树脂基质和碳纤维织物。将未经处理的复合材料表面分别与聚酯可剥布处理的复合材料表面和尼龙可剥布处理的复合材料表面进行比较,可以发现,聚酯可剥布处理的表面 O 元素含量大于未经处理的复合材料表面 O 元素含量, O 元素的存在对复合材料的胶接是有利的^[11, 15]。氧元素含量较高,表面存在较多的含氧活性基团,如:羧基、羟基等,在环氧树脂固化时,环氧基团可以与含氧活性基团反应,提高其表面胶接强度。因此,

表 2 不同可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料的表面化学组成

Table 2 Surface chemical compositions of T300/Cycom 970 epoxy composite surfaces treated with different peel plies %

Peel ply	C	O	N	Si
Control	70.57	18.11	3.14	7.25
P1	75.33	20.42	1.95	1.61
P2	72.88	23.90	1.59	0.72
P3	74.62	15.16	8.30	1.08
P4	67.73	18.37	7.66	5.15

其对应的复合材料胶接强度较好,与力学性能结果相符。尼龙可剥布处理的复合材料表面 N 含量大于未经处理的复合材料表面和聚酯可剥布处理的复合材料表面 N 含量,说明尼龙处理后的复合材料表面含氮官能团增加,可能是尼龙可剥布织物转移至复合材料表面,使复合材料表面存在大量 N 元素。

两种聚酯可剥布 P1 和 P2 处理后的复合材料表面元素含量没有明显差异;而对于两种尼龙类可剥布, P4 可剥布处理后的复合材料表面检测到 Si 元素,可能原因是 P4 可剥布织物表面含有硅酮涂层;同时在未经处理的复合材料表面也检测到 Si 元素,可能是由于隔离膜上含有 Si 涂层,未经处理的复合材料表面与 P4 可剥布处理后的复合材料表面胶接性能均较低,可能与表面存在 Si 元素有关, Si 元素的存在会导致胶接质量下降^[16]。

为进一步分析可剥布处理后复合材料表面基团组成,对 XPS 的 C_{1s} 峰进行分峰处理。通过软件计算各基团对应的峰面积,将峰面积相互比较后得出各基团在表面体系中的相对含量,如表 3 所示。聚酯可剥布处理的表面与未经处理的复合材料表面相比, —C=O 的含量增加,即经聚酯可剥布处理后,复合材料表面含有大量的含氧官能团。而尼龙可剥布处理的表面与未经处理相比,酰胺键的含量增加,说明经尼龙类可剥布处理后,复合材料表面有一定的尼龙织物残留,导致其对应的胶接性能较低。

2.4 未经处理与可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧表面润湿性

未经处理和不同可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料层合板接触角和表面能结果如表 4 所示。可见,经过可剥布处理后的复合材料表面接触角小于未经处理的表面,表明可剥布处理可以改

表 3 不同可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面 XPS 的 C_{1s} 分峰拟合数据

Table 3 C_{1s} peak-differentiating and imitating data for XPS of T300/Cycom 970 epoxy composite surfaces treated by different peel plies

Peel ply	Species	Binding energy	Content/%
Control	CC/CH	284.02	57.4
	CO/CN	284.82	42.6
P1	CC/CH	284.37	50.5
	CO	285.09	44.9
	C=O	288.68	4.6
P2	CC/CH	284.57	80.0
	CO	286.56	10.3
	C=O	288.65	9.7
P3	CC/CH	284.89	29.3
	Amide	286.00	31.8
	CO/CN	284.34	38.9
P4	CC/CH	284.27	19.6
	Amide	287.55	8.9
	CO/CN	284.69	71.5

表 4 可剥布处理和未经处理的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面接触角及表面能值

Table 4 Contact angle measurements of T300/Cycom 970 epoxy composite surfaces treated with several peel plies and untreated composite surface

Substrate-peel ply	Contact angle/(°)			Surface energy $\gamma_{\text{tot}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
	DI water	Diiodomethane	Ethylene glycol	
970	96.13	53.61	64.20	33.017
970-P1	70.29	7.08	27.49	57.246
970-P2	67.11	14.75	28.45	58.834
970-P3	50.33	17.97	23.07	75.075
970-P4	79.89	31.58	36.84	46.660

3 结 论

(1) 采用可剥布处理 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面,可以改善其表面润湿性,提高表面能,但只有表面能值在合适的范围内才能对胶接质量产生有利影响。

(2) 可剥布织物在 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面的残留直接影响胶接质量。聚酯可剥布残留表现为织物丝束断裂。尼龙可剥布的残留通过 XPS 元素分析可以观察到 N 元素以及酰胺键的转移。

(3) 可剥布织物编织形式直接影响可剥布处理后的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面形貌,从而影响胶接质量。

(4) 经聚酯可剥布处理的 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面含有较多 O 元素,表面可能含有 O 的活性基团,有利于提高复合材料的表面活性,进而改善胶接质量。

善复合材料的表面浸润性能,进而提高纤维表面与胶膜的界面结合^[11]。P4 尼龙涂层可剥布处理后的复合材料表面能最小,润湿性相对较差,影响复合材料胶接质量。P3 尼龙处理后的复合材料表面能最大,复合材料表面有良好的润湿性,但 P3 可剥布处理的复合材料剪切强度和剥离强度均较低,破坏模式为黏附破坏,胶接质量较差。P1、P2 两种聚酯可剥布处理后的复合材料表面的表面能相差不大,但其胶接破坏模式差异较大,因此,表面能并不是影响胶接质量的唯一因素,只有表面能处于较适当的水平时,才会对胶接质量产生有利效果^[11, 17]。由此说明,可剥布处理虽然会提高复合材料表面的润湿性,增大表面能值,但是表面能高并不意味着较好的胶接质量^[18],这是由于胶接质量还与表面形貌和表面活性有关。

(5) 可剥布织物表面涂层,如 Si 涂层,会残留在 T300/Cycom 970 环氧复合材料表面,影响胶接质量。

参考文献:

- [1] 郭丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
XING L Y, BAO J W, LI S M, et al. Development of status and facing chanllenge of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-1338 (in Chinese).
- [2] 黄志超,陈伟达,程雯玉,等. 复合材料连接技术进展[J]. 华东交通大学学报, 2013(4): 16-29.
HUANG Z C, CHEN W D, CHENG W Y, et al. Development of composite connection techniques[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013(4): 16-29 (in Chinese).
- [3] 叶斐. 碳纤维层合板胶接性能研究[D]. 中北大学, 2015.
YE P. Researches about the bonding performance of carbon

- fiber laminated plates[D]. North University of China, 2015 (in Chinese).
- [4] COTTER J L, MAHOON A. Development of new surface pretreatments, based on alkaline hydrogen peroxide solutions, for adhesive bonding of titanium[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1982, 2(1): 47-52.
- [5] BOSSI R, CARLSEN R, JAMES B F, et al. Composite surface preparation QA for bonding[C]. Long Beach, USA, Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition, 2005: 1-5.
- [6] 上官倩英, 蔡泖华. 碳纤维及其复合材料的发展及应用[J]. 上海师范大学学报, 2008, 37(3): 275-278.
SHANG GUAN Q Q, CAI M H. The development and application of carbon fiber and its composite materials[J]. *Journal of Shanghai Normal University*, 2008, 37(3): 275-278 (in Chinese).
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM D5868-01 Lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding[S]. West Conshohocken: Annu. Book ASTM Stand, 2001.
- [8] American Society for Testing and Materials. Strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading (Engineering Plastics-to-Engineering Plastics): ASTM D3807-98 (2004)[S]. West Conshohocken: Annu. Book ASTM Stand, 2004.
- [9] 王晖, 顾幅华. 熟料浮选[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
WANG H, GU G H. Clinker flotation[M]. Changsha: Central South University Press, 2006 (in Chinese).
- [10] 王旭, 陈璐圆, 陈萍, 等. 民用航空复合材料成型用可剥布评价与选用[J]. 航空制造技术, 2015(19): 8891-8894.
WANG X, CHEN L Y, CHEN P, et al. Evaluation methods and selection of peel ply in fabrication process of civil aviation composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(19): 8891-8894 (in Chinese).
- [11] BÉNARD Q, FOIS M, GRISEL M. Peel ply surface treatment for composite assemblies: Chemistry and morphology effects[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2005, 36(11): 1562-1568.
- [12] BÉNARD Q, FOIS M, GRISEL M, et al. Influence of fibre reinforcement and peel ply surface treatment towards adhesion of composite surfaces[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2005, 25(5): 404-409.
- [13] BÉNARD Q, FORIS M, GRISEL M, et al. Influence of the polymer surface layer on the adhesion of polymer matrix composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2009, 22(1): 51-61.
- [14] KIERONSKI E A, KNOCK K K, FALLON W P, et al. Mechanism of adhesive in secondary bonding of fiberglass composites with peel ply surface preparation[J]. *ASTM STP*, 2004, 1455: 78-91.
- [15] BARDIS L, KEDWARD K. Effects of surface preparation on the long-term durability of adhesively bonded composite joints [AN. DOT/FAA/AR-03/53, 2004.
- [16] HART-SMITH L J, REDMOND G, DAVIS M J. Curse of the nylon peel ply[R]. McDonnell Douglas, 1996.
- [17] BÉNARD Q, FOIS M, GRISEL M. Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(10): 4753-4758.
- [18] FLINN B, HICKMOTT C. Role of surface preparation on durability of bonded composite joints[C]. Seattle, Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition, 2010: 17-20.