

文章编号: 1001-4888(2016)05-0664-09

复合材料层合板单搭胶接力学性能检测技术与分析^{*}

杨康^{1,2}, 吴振¹, 高双胜^{1,3}, 王吉²

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136; 2. 辽宁通用航空研究院, 沈阳 110136;
3. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 胶接工艺缺陷对单搭胶接接头的拉伸剪切性能有着重要的影响。为了研究不同单搭胶接胶层厚度对不同材质复合材料层合板胶接性能的影响规律, 通过喷水穿透法超声 C 扫描对试样的剪切区域进行无损检测, 并分别采用 1mm、2mm、4mm 的胶层厚度, 以碳纤维/玻璃纤维复合材料层合板为被粘物, 进行单搭胶接拉伸剪切性能试验。检测及试验结果表明: 当胶层厚度 $h > 1\text{mm}$ 时, 对于相同材料的被粘物, 胶层厚度越大, 试件胶接接头剪切强度越小; 相同的粘接剂厚度, 以碳纤维增强复合材料板为被粘物的试件胶接接头剪切强度大于以玻纤增强复合材料板为被粘物的试件胶接接头强度; 胶粘剂与碳纤维被粘物表面的润湿效果要优于胶粘剂与玻纤被粘物表面的润湿效果。

关键词: 复合材料层合板; 单搭接; 胶接; 喷水穿透法

中图分类号: O348

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-010

0 引言

纤维增强树脂基复合材料具有质量轻、比强度高、结构整体应力分布均匀等优点, 在航空航天工业中发挥着越来越重要的作用^[1]。实践证明, 对复合材料结构来说, 胶接连接是一种较理想的连接方法, 胶接技术^[2]现已成为航空航天工艺中不可缺少的一种连接工艺技术。传统的胶粘剂来源主要靠天然形成, 其强度一般相对较小, 进入新世纪以来, 随着高分子化学工业的迅速发展, 新型的合成胶粘剂开始广泛应用, 相对于天然的胶粘剂, 它具有更强的粘合强度和更好的稳定性。随着胶接技术研究的不断加深, 胶接技术已经开始广泛应用于航空航天、汽车轮船和机械工业等领域。Li^[2] 和 Adams^[3] 等考虑了单搭胶接接头的拉伸载荷与弯曲应力的耦合效应, 提出了单搭胶接接头中胶层的应力和应变分析模型。江乐彬^[4] 等采用数值模拟和光测技术对单向拉伸载荷作用下单搭接胶接接头中的剪切性能进行分析, 研究了不同厚度胶层中切应力的变化规律, 结果表明胶粘剂的厚度较小时, 胶粘剂中切应力的分布统计参数随着其厚度的增加会有显著的变化, 但是当厚度超过一定的数值时, 统计参数对厚度的变化不再敏感。郑权^[5] 等采用试验和有限元方法, 对含胶接缺陷的椭球泡沫夹层结构在外压作用下的破坏模式和承载能力进行了研究, 数值结果表明含胶接缺陷结构易发生面板皱褶, 且结构顶部和根部区域较易发生界面脱粘扩展。Fitton^[6] 和 Ichikawa^[7] 等通过改变胶层的杨氏模量及厚度对胶接接头进行了优化设计, 主应力的最大值发生在搭接区胶层界面边缘处, 并且随着胶层杨氏模量增加及胶层厚度减小而减

^{*} 收稿日期: 2016-01-16; 修回日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11272217), 辽宁省自然科学基金计划(2013024018), 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金(AWJ-M13-05)

通讯作者: 吴振, 教授, 博士生导师, 主要从事复合材料力学研究。Email: wuzhenhk@163.com

小。上述文献均未采用试验与无损检测相结合的方法对复合材料单搭胶接性能进行研究。

复合材料结构件的无损检测方法应根据其结构形式而定。一般对复合材料面板与蜂窝芯的胶接推荐用声阻法或激光全息摄影无损检测；对复合材料与金属胶接、复合材料与复合材料胶接推荐用射频超声检测、超声 C 扫描检测方法；为适应外场无损检测的需要，现已研制出采用射频超声、微机控制、光标图像定位技术的手动 C 扫描无损检测系统，因此，本文利用自行搭建的喷水穿透超声 C 扫描检测系统进行检测。

1 试验材料和方法

1.1 喷水穿透超声 C 扫描检测

图 1 为自行搭建的喷水穿透超声 C 扫描检测系统，图 2 为超声信号发射、接收示意图。如图 1 所示，该扫描系统有一发一收两个探头，扫描过程中，两个探头分别置于层压板的两侧，并且保证超声波垂直入射层压板，探头频率为 200kHz，晶片直径为 25mm。如图 2 所示，当超声波穿过试样内无损伤部位时，接收探头收到的信号较强；当超声波穿过损伤部位时，超声波信号大部分甚至全部被反射，另一侧的接收探头只能接收到部分信号。当胶接缺陷面积较大时接收探头将接收不到信号，根据接收探头得到的超声信号能量即可判断损伤状况。

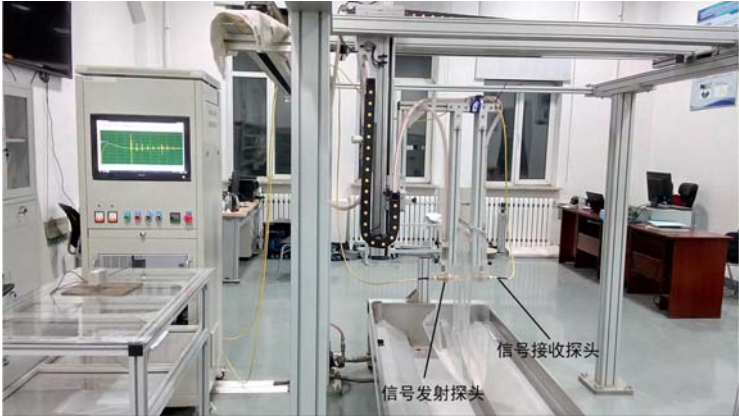


图 1 自行搭建的喷水穿透超声 C 扫描检测系统

Fig. 1 Self built water jet penetration ultrasonic C scanning detection system

1.2 试验件材料及制备

胶粘剂由 LY 1564 SPT 树脂和 XB 3487 固化剂按重量比 100 : 34 配制，常温固化 22±2h；被粘物材料，碳纤维材料选用 T300 3K 40B/1000，玻纤材料选用 SW 110C/90A；不同材料的被粘物和不同胶层厚度的每种接头试验件数均为三个。为确保两被粘接试验件对齐，尽可能使胶层厚度均匀一致；胶层厚度使用间隔导线控制，导线平行于施力方向，保证导线对粘接部位的影响最小，另外，粘接过程中使用夹具对胶接件进行准确定位。树脂、固化剂和增强体材料均广泛应用于航空、航天结构，因此选择这种典型的航空通用材料进行单搭接胶接拉伸剪切强度试验。

1.3 拉伸剪切试验

试验参照 GB/T 7124—2008《胶粘剂拉伸剪切强度的测定》进行，采用位移控制，对试件进行单向

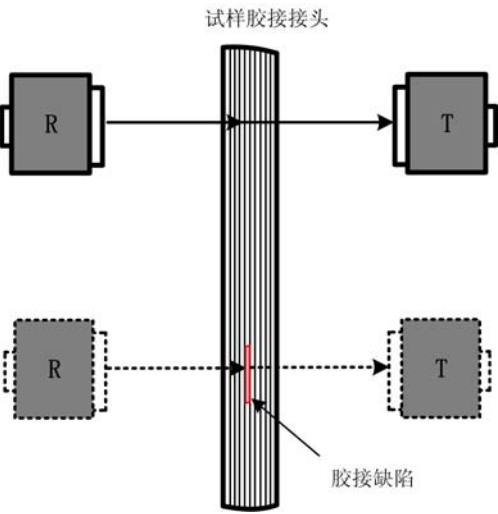


图 2 超声信号发射、接收示意图

Fig. 2 Signal transmitting and receiving of ultrasonic signal

加载,试验在室温、准静态拉伸载荷下进行,纵向拉伸加载速率为 $1.3\text{mm}/\text{min}$ 。试验件主轴方向与胶接件的切割方向一致,如图 3 所示(单位:mm),其中:1 为胶粘剂;2 为夹持区域;3 为剪切区域。图 4(a)为拉力试验机,型号为 Instron 8801,配置一副可自动调心的夹具;图 4(b)~(d)为试件装夹情况,夹具中使用垫片,既可保证作用在试验件上的载荷通过试件的几何中心,又可以防止试件被夹坏。加载时,夹具及其附件与试样无相对移动,保证试样长轴与施力方向及夹具中心线保持一致,避免夹具与胶接件由螺栓固定产生附加的应力集中。

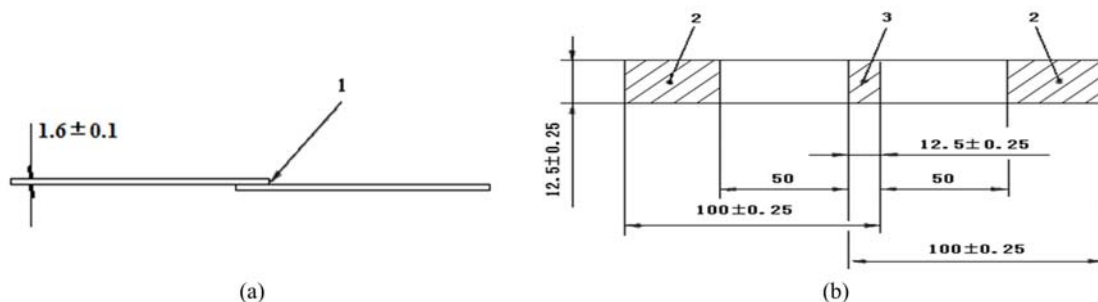


图 3 (a)和(b)为标准试件的形状和尺寸

Fig. 3 (a) and (b) show the shape and size of the standard specimen

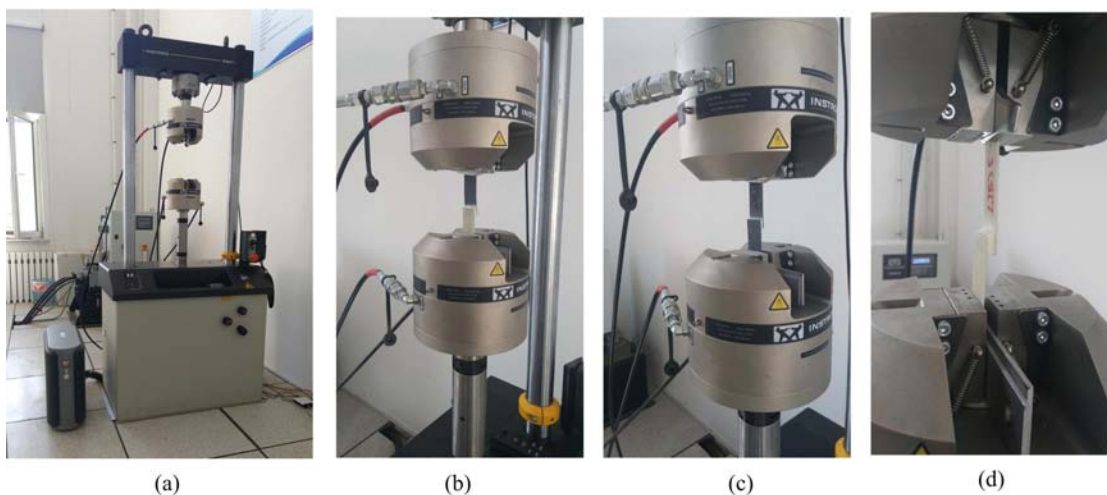


图 4 (a)为 Instron 8801 拉力试验机;(b)、(c)、(d)分别为碳纤维/玻璃纤维、碳纤维/碳纤维、玻璃纤维/玻璃纤维试件装夹情况

Fig. 4 (a) show the tensile testing machine of Instron 8801; (b)、(c) and (d) show the clamping condition of carbon fiber/glass fiber, carbon fiber/carbon fiber and glass fiber/glass fiber specimen

2 结果和讨论

2.1 胶接缺陷的超声 C 扫描检测结果分析

C 扫描成像是超声无损检测中发展较早且广泛应用的成像技术。常采用喷水穿透法进行检测,以栅格扫描方式对垂直于声束方向的被测试样进行逐点扫描,记录每一点的超声波信号,并且对其渡越时间信号进行采样和模数转换,运用现代信号和图像处理技术在计算机屏幕上直观地显示含有缺陷形状、位置及大小等信息的灰度或伪彩色图像,从而达到评价结构质量的目的^[8]。

图 5(a)~(i)为试验前对试验件(见表 1、表 2、表 3)单搭胶接接头部分进行喷水穿透法超声 C 扫描检测后生成的图像,图中颜色标尺表示探头接收到的超声波能量即信号的幅值,满屏为 100%,其中,红色区域表示剪切区域以外的部分,蓝色区域表示单搭胶接部分,绿色区域是由于喷水流速导致扫描信号不稳定造成的。由于喷水穿透法超声 C 扫描检测结果受喷水水流影响较大,因此造成超声波能量信号不稳定,但是并不影响对单搭接部分缺陷的检测。根据图 5 检测结果表明,各试验件胶接接头在相同胶

粘工艺下,除因喷水水流影响造成的超声波能量不稳定外,未产生图6所示的缺陷情况^[9],说明各试验件在制件过程中剪切区域均未出现缺陷情况,胶接接头粘接完好。

2.2 胶粘剂拉伸剪切强度试验分析

拉伸剪切试验时,为了降低试验数据的误差,每种不同胶接厚度、被粘物材料的试验件进行三组试验,试验结果数据取平均值,并且被粘物材料为相同的铺层方向及层数。

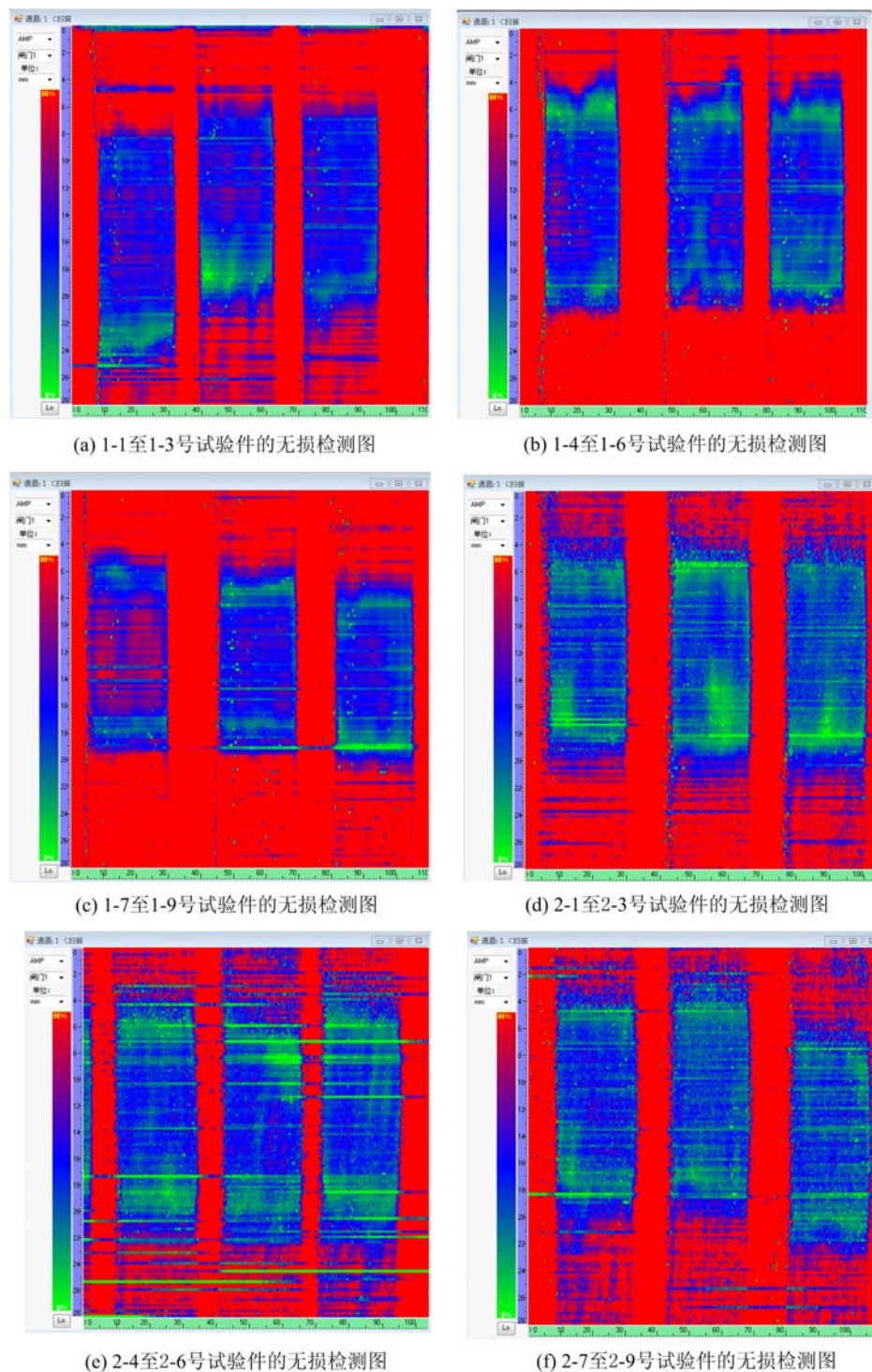


图5 试验件胶接接头喷水穿透法超声C扫描检测图像

Fig. 5 The water jet penetration method ultrasonic C scanning image of single-lap joints

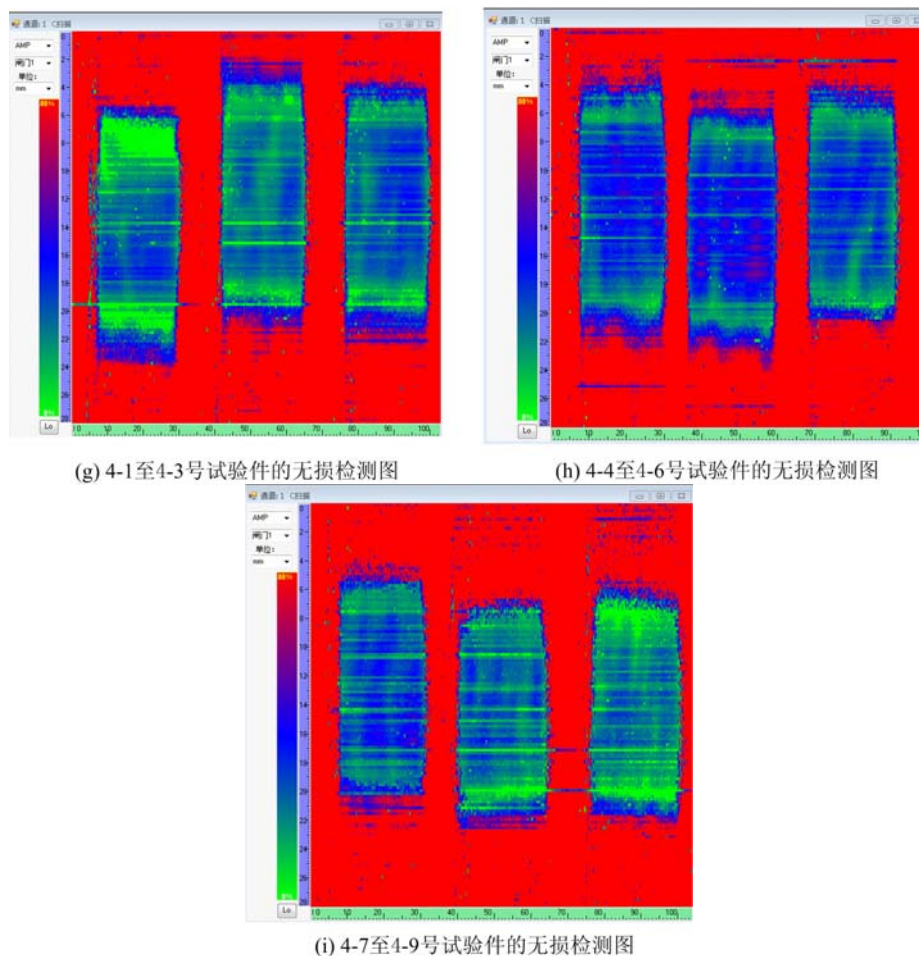


图 5(续) 试验件胶接接头喷水穿透法超声 C 扫描检测图像

Fig. 5 The water jet penetration method ultrasonic C scanning image of single-lap joints

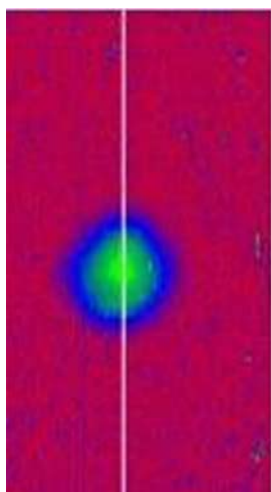


图 6 缺陷存在的情况下,喷水穿透法超声 C 扫描检测产生的图像

Fig. 6 The image generated by the ultrasonic C scan of the water jet penetration method if the defect exists

表 1、表 2、表 3 为各试验件的外形尺寸、胶层厚度及剪切强度值,由表中试验数据可知,相同铺层方向、铺层层数的被粘物,在不同材料、不同胶层厚度情况下,胶接接头的抗剪切性能不同。当胶层厚度 $h > 1\text{mm}$ 时,相同材料的被粘物,胶层厚度 h 越大,剪切强度 σ_c 越小;相同的粘接剂厚度,以碳纤维增强复合材料板为被粘物的胶接接头剪切强度大于以玻纤增强复合材料板为被粘物的胶接接头强度。

2.3 胶接接头失效情况分析

润湿是粘合产生的首要条件,只有保证胶粘剂与被粘物表面之间良好的润湿,才能得到性能较好的接头。润湿不仅跟胶粘剂的表面张力有关,还与被粘物的表面张力有关,一般地,只有胶粘剂的表面张力小于被粘物的表面张力时,才能产生较好的润湿。因此,胶粘剂的表面张力较小,而被粘物的表面张力较大时,润湿就会较好,反之则相反。

表 1 试验件的剪切强度(胶层厚度 $h=1\text{mm}$)
Tab.1 The shear strength of the specimens ($h=1\text{mm}$)

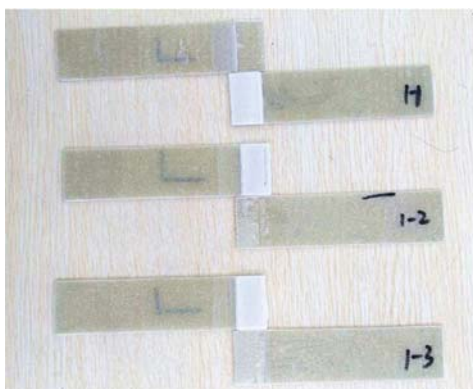
被粘物 材料	编号	宽度 $a(\text{mm})$	胶层厚度 $h(\text{mm})$	胶层横截 面积 $S(\text{mm}^2)$	剪切强度 $\sigma_c(\text{MPa})$
玻璃纤维/ 玻璃纤维	1-1	25.690	1.11	28.516	90.430
	1-2	25.370	1.04	26.385	64.283
	1-3	25.380	1.06	26.903	77.434
	均值	25.480	1.070	27.268	77.382
碳纤维/ 玻璃纤维	1-4	25.55	1.00	25.550	101.322
	1-5	25.56	1.00	25.560	93.198
	1-6	25.8	1.00	25.800	67.455
	均值	25.637	1.000	25.637	87.325
碳纤维/ 碳纤维	1-7	24.910	0.98	24.412	358.507
	1-8	25.210	1.13	28.487	314.994
	1-9	25.370	1.13	28.668	334.057
	均值	25.163	1.080	27.189	335.853

表 2 试验件的剪切强度(胶层厚度 $h=2\text{mm}$)
Tab.2 The shear strength of the specimens ($h=2\text{mm}$)

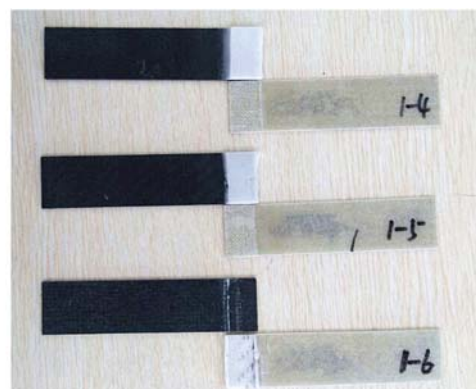
被粘物 材料	编号	宽度 $a(\text{mm})$	胶层厚度 $h(\text{mm})$	胶层横截 面积 $S(\text{mm}^2)$	剪切强度 $\sigma_c(\text{MPa})$
玻璃纤维/ 玻璃纤维	2-1	25.93	1.81	46.933	44.927
	2-2	25.72	2.18	56.070	29.447
	2-3	25.74	2.07	53.282	33.514
	均值	25.797	2.020	52.095	35.963
碳纤维/ 玻璃纤维	2-4	25.21	2.21	55.714	42.100
	2-5	25.16	1.97	49.565	35.607
	2-6	25.16	2.10	52.836	61.313
	均值	25.177	2.093	52.705	46.340
碳纤维/ 碳纤维	2-7	25.67	1.98	50.827	79.485
	2-8	25.6	2.00	51.200	74.333
	2-9	25.75	1.72	44.290	63.318
	均值	25.673	1.900	48.772	72.379

表 3 试验件的剪切强度(胶层厚度 $h=4\text{mm}$)
Tab. 3 The shear strength of the specimens ($h=4\text{mm}$)

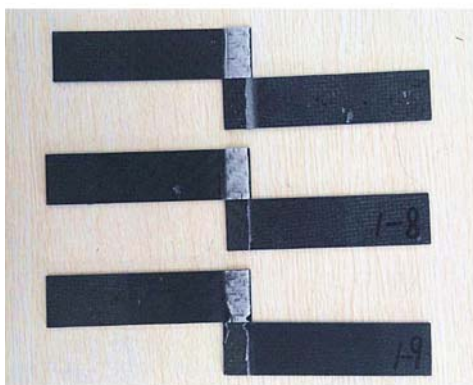
被粘物 材料	编号	宽度 $a(\text{mm})$	胶层厚度 $h(\text{mm})$	胶层横截 面积 $S(\text{mm}^2)$	剪切强度 $\sigma_c(\text{MPa})$
玻璃纤维/ 玻璃纤维	4-1	25.4	3.93	99.822	8.544
	4-2	25.56	4.05	103.518	13.654
	4-3	25.49	3.90	99.411	16.096
	均值	25.483	3.960	100.917	12.765
碳纤维/ 玻璃纤维	4-4	25.4	3.93	99.822	17.869
	4-5	25.56	4.05	103.518	14.207
	4-6	25.49	3.90	99.411	12.670
	均值	25.483	3.96	100.917	14.915
碳纤维/ 碳纤维	4-7	25.4	4.35	110.490	18.519
	4-8	25.79	4.12	106.255	15.759
	4-9	25.73	4.11	105.750	17.733
	均值	25.640	4.193	107.498	17.337



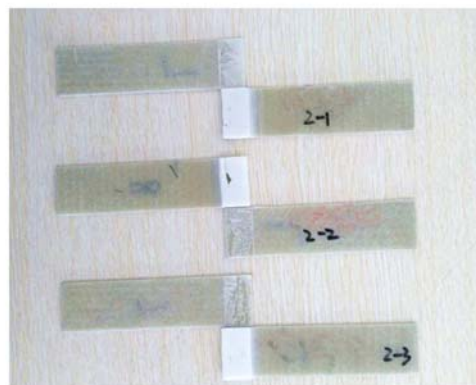
(a) 破坏后的1-1至1-3号试验件



(b) 破坏后的1-4至1-6号试验件



(c) 破坏后的1-7至1-9号试验件

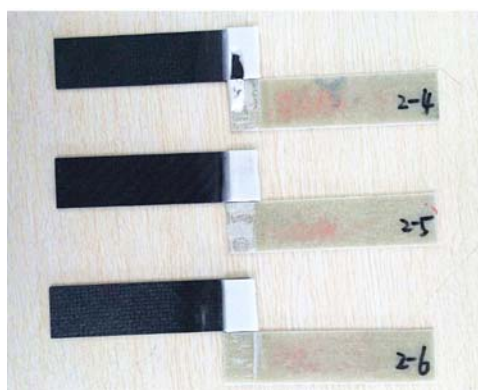


(d) 破坏后的2-1至2-3号试验件

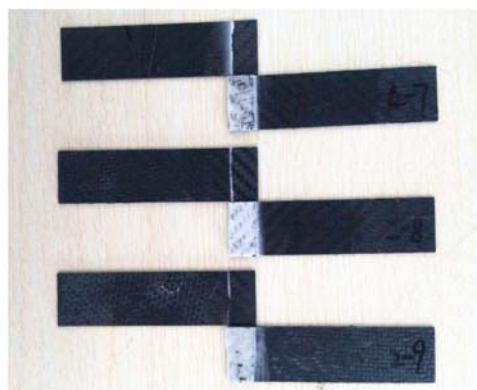
图 7 试验后胶接接头区域情况

Fig. 7 The adhesive joint regional situation after test

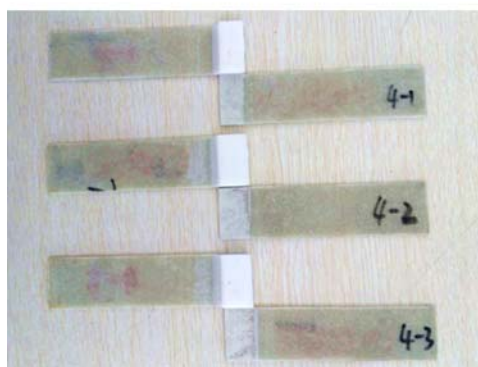
图 7 为试件试验后胶接接头区域情况,根据图 7(a)~(i)可以发现,胶接接头在拉伸载荷作用下的主导破坏模式均为内聚破坏^[10](Cohesive failure),接头分离位置在胶层内,失效后表现为在两个层合



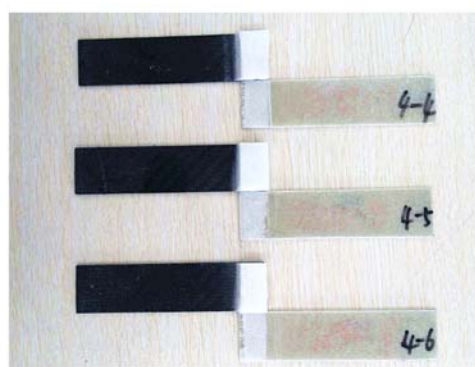
(c) 破坏后的2-4至2-6号试验件



(f) 破坏后的2-7至2-9号试验件



(g) 破坏后的4-1至4-3号试验件



(h) 破坏后的4-4至4-6号试验件



(i) 破坏后的4-7至4-9号试验件

图7(续) 试验后胶接接头区域情况

Fig. 7 The adhesive joint regional situation after test

板被粘物上均附着胶粘剂。根据图7(b)、图7(e)、图7(i)可知,拉伸剪切试验后,大部分胶粘剂均残留在碳纤维的剪切区域,仅有少许残留在玻纤剪切区域,从润湿的效果角度讲,胶粘剂与碳纤维表面的润湿效果要优于胶粘剂与玻纤表面的润湿效果。

3 结语

胶接工艺缺陷对单搭胶接接头的拉伸剪切性能有着重要的影响,本文利用自行搭建的喷水穿透超声C扫描检测系统,通过喷水穿透法超声C扫描对试样的胶接接头进行无损检测,并以碳纤维/玻璃纤维复合材料层合板为被粘物,

分别对1mm、2mm、4mm厚度胶层的胶接接头进行单搭胶接拉伸剪切性能试验。结果表明:

- (1) 在单搭胶接接头胶接工艺相同并且均无胶接缺陷情况下,当复合材料被粘物铺层方向、铺层层数相同且胶层厚度 $h > 1\text{mm}$ 时,对于相同材料的被粘物,胶层厚度越大,胶接接头剪切强度越小;
- (2) 对于相同的胶粘剂厚度,以碳纤维增强复合材料板为被粘物的胶接接头剪切强度大于以玻纤增强复合材料板为被粘物的胶接接头强度;
- (3) 胶粘剂与碳纤维表面的润湿效果要优于胶粘剂与玻纤表面的润湿效果。

参考文献:

- [1] 屈天骄, 郑锡涛, 范献银等. 复合材料层合板低速冲击损伤影响因素分析[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6):81—86 (QU Tianjiao, ZHENG Xitao, FAN Xianyin, et al. Exploration of several influence factors of low-velocity impact damage on composite laminates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6):81—86(in Chinese))

- [2] Li G, Pang S S, Woldesenbet E, et al. Investigation of prepreg bonded composite single lap joint[J]. *Composites: Part B*, 2001, 32:651—658.
- [3] Adams R D, Pepplett N A. Stress analysis of adhesive bonded lap joints [J]. *Journal of Strain Analysis*, 1974, 9 (3):185—196.
- [4] 江乐彬, 谢惠民, 王怀喜 等. 单搭接胶接接头拉伸剪切性能的数值模拟与实验研究[J]. *实验力学*, 2012, 27 (6):643—649 (JIANG Lebin, XIE Huimin, WANG Huaixi, et al. Numerical simulation and experimental study of tensile shear performance of adhesively bonded single-lap joint[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(6):643—649(in Chinese))
- [5] 郑权, 韩涵, 唐杰 等. 含胶接缺陷的椭球泡沫夹层结构破坏机理与承载能力研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(2): 207—214 (ZHENG Quan, HAN Han, TANG Jie, et al. On the mechanism and bearing capacity of ellipsoidal foam-core sandwich structure with adhesive bonding defects[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(2): 207—214 (in Chinese))
- [6] Fitton M D, Broughton J G. Variable modulus adhesives: An approach to optimized joint performance [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2005, 25:329—336.
- [7] Ichikawa K, Shin Y, Sawa T. A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008, 28:464—470.
- [8] 高双胜, 刚铁, 桂光正 等. 铜钢堆焊接头的超声信号特征及质量评价[J]. *焊接学报*, 2007, 28 (5):101—104 (GAO Shuangsheng, GANG Tie, GUI Guangzheng, et al. Ultrasonic signal character and quality evaluation of Cu/steel surfacing weld[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28 (5):101—104(in Chinese))
- [9] 贺君, 张利国. 镁合金搅拌摩擦加工组织的超声无损表征研究[D]. 沈阳航空航天大学硕士论文, 2015 (HE Jun, ZHANG Ligu. Ultrasonic nondestructive characterization of friction stir processing of magnesium alloy[D]. Shenyang Aerospace University, 2015 (in Chinese))
- [10] 杨银环, 周振功, 郭颖 等. 缺陷对单搭接胶接接头力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(5):157—163 (YANG Yinhuan, ZHOU Zhengong, GUO Ying, et al. Effect of defects in the adhesive layer on strength of adhesively bonded single-lap composite joints[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2012, 29(5):157—163(in Chinese))

On the Mechanical Properties Detection Technology and Analysis of Composite Laminated Plate with Single-Lap Adhesive Bonding

YANG Kang^{1,2}, WU Zhen¹, GAO Shuang-sheng^{1,3}, WANG Ji²

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Bonding process defects have important effect on tensile and shear properties of single-lap adhesive bonding joint. In order to study the effect of single-lap adhesive layer thickness on bonding performance of different composite laminated plates, using ultrasonic C scan of water jet penetration method to nondestructively examine the shear area of specimen, adopting three adhesive layer thicknesses (1mm, 2mm, 4mm) and carbon fiber/glass fiber composite laminate as the object to be bonded, experiment of tensile and shear properties of single-lap adhesive bonding joint was carried out. Detection and experimental results show that when the layer thickness h is larger than 1mm, for the same material to be bonded, the thicker the adhesive layer is, the less the shear strength of adhesive bonding joint; for the same adhesive thickness, the shear strength of carbon fiber enhanced composite is larger than that of glass fiber enhanced composite. The surface wetting effect for adhesive and carbon fiber interface is better than that of interface of adhesive and glass fiber.

Keywords: composite laminated plate; single-lap; adhesive bonding; water jet penetration method