

不同环境下J299胶膜胶接接头试验研究*

雷安民, 邓凡臣, 邹 鹏

(航空工业飞机强度研究所, 西安 710065)

[摘要] 在3种不同的环境下,分别进行了两种不同纤维(T700/ZT7H)制备的单搭接接头的拉伸剪切性能试验,研究了不同环境对J299胶膜胶接接头剪切强度的影响。试验结果表明: T700和ZT7H胶接接头在ETW(高温湿态)环境下的剪切强度均值约为RTD(常温干态)环境的78%和79%,在CTD(低温干态)环境下的剪切强度均值约为RTD环境的1.11倍和1.04倍。在RTD、CTD和ETW的环境下,ZT7H胶接接头剪切强度分别是T700胶接接头强度的1.32倍、1.23倍和1.34倍。

关键词: 复合材料; 胶接接头; 剪切强度; 温湿度; 纤维

Experimental Study on Adhesive Joints With J299 Film Under Different Environments

LEI Anmin, DENG Fanchen, ZOU Peng

(AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

[ABSTRACT] The tensile shear experiments of two types of single-lap composite joints processed respectively by T700 and ZT7H fibers under three different environments are carried out to investigate the influence of different environments on shear strength of adhesive joints with J299 film. The experimental results proved that: The shear strengths of T700 and ZT7H adhesive joints in Elevated Temperature Wet (ETW) environment are respectively about 78% and 79% of that in Room Temperature Dry (RTD) environment, and the shear strengths in Cold Temperature Dry (CTD) environment are about 1.11 times and 1.04 times of that in RTD environment. Moreover, in RTD, CTD and ETW environments, the shear strength of ZT7H adhesive joints is 1.32 times, 1.23 times and 1.34 times of that of T700 adhesive joints.

Keywords: Composites; Adhesive joints; Shear strength; Temperature and humidity; Fibers

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.08.077

复合材料具有比强度高、比模量大、抗疲劳、抗腐蚀性等优点,以及优越的整体固化成形工艺性,适合大型构件与复杂型面构件制造,因而在航空领域中得到了广泛应用^[1]。复合材料结构整体化设计技术则是实现结构低成本、高性能的有效途径,如航空结构中常用的多墙结构、多肋结构^[2]。胶接是实现复合材料结构整体化设计的主要方法,而对胶接性能影响最大的是温度和湿度,特别是在高温湿态环境下,胶接结构的力学性能明显下降。

复合材料整体化结构的不断发展与应用,对结构胶耐高温性、韧性及与树脂基碳纤维复合材料的匹配性等方面提出了更高的要求^[3]。J299胶膜是一种新型双马胶膜,由黑龙江石油化工研究院研制,具有较好的韧性、强度、耐热性。近年来,国内对J299胶膜的

应用进行了一些研究:陈丽敏等^[4]通过对采用双马胶膜J299和环氧胶膜J116B制取的整体化结构试件的拉脱和侧弯试验等,证明了J299胶膜的力学性能优于J116B;孙文博等^[5]通过试验研究得出J299胶膜复合材料T型接头的极限拉伸位移和极限拉伸载荷相比于J116B胶膜有了较大的提高。但他们对J299胶膜胶接结构的研究都是在常温干态下进行的,并没有涉及温湿度变化对胶接结构的影响。本文拟对采用J299胶膜的单搭胶接接头在不同环境下的拉伸力学性能进行试验研究,通过对比胶接接头在不同环境下所能承受的载荷,为J299胶膜胶接结构性能的研究提供参考。

1 试验件

试验件及尺寸如图1所示(单位为mm)。子层1的材料为T700/5429或ZT7H/5429,由T700/5429制成

* 基金项目: 航空科学基金(2018ZE23011)。

的试验件称为 T700 试验件,由 ZT7H/5429 制成的试验件称为 ZT7H 试验件。它们的铺层为: [45/0/-45/90/-45/45/0/-45/90/45]_s, 单层厚度 0.125mm, 共 20 层。加强片厚度为 2.5mm。胶接区长度为 15mm, 采用 J299 胶膜进行胶接。T700 试验件和 ZT7H 试验件各 18 件, 见表 1。

表 1 中试验件编号第 2 部分表示试验环境:

(1)CTD (Cold Temperature Dry) ——低温干态: 温度 -55℃, 吸湿量 = 制造状态。

(2)RTD (Room Temperature Dry) ——试验前在室内大气环境((23±2)℃, 50%±10% RH) 中至少放置 24h 制造状态的试样。

(3)ETW (Elevated Temperature Wet) ——高温湿态: 135℃, 相对湿度 85%, 吸湿量达到饱和。引入方法如下: 吸湿过程按照 ASTM D 5229——2014 标准进行。先将试样放在温度 70℃、相对湿度 85% 的稳态环境中放置到吸湿平衡, 再将试样在 135℃、85% 的高温湿态环境下进行测试。

2 试验方法

待试验件达到试验状态后进行试验, 安装时直接将试验件夹持于试验机夹头中, 调整试验件的位置, 保证施加的载荷通过试验件的几何中心。对于 CTD 和 ETW 试验, 需要设定环境箱的温度, 夹持好试验件后关闭环境箱, 当达到需要温度后, 保温 3min 后再开始试验。

表 1 试验件列表
Table 1 Test piece list

试件编号	数量	试件编号	数量
T700-RTD-1~6	6	ZT7H-RTD-1~6	6
T700-CTD-1~6	6	ZT7H-CTD-1~6	6
T700-ETW-1~6	6	ZT7H-ETW-1~6	6

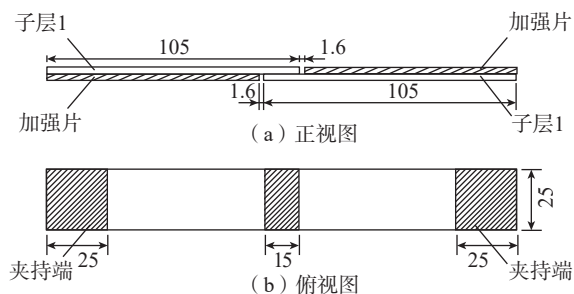


图 1 试验件尺寸
Fig.1 Specimen size

3 数据处理

试验件拉伸剪切强度按照 GB/T 7124—2008 计算:

$$\tau = P / (Lb)$$

式中, τ 为胶黏剂拉脱剪切强度 (MPa); P 为最大载荷 (N); L 为胶黏长度平均值 (mm); b 为胶粘宽度平均值 (mm)。

4 试验结果与讨论

从图 2 可以看出, 对于同类试验件来说, 接头在 CTD 下的剪切强度略高于 RTD, 而在 ETW 下的剪切强度则低于 RTD。对于相同环境下的不同试验件来说, T700 试验件的剪切强度小于 ZT7H 试验件。由此看来, 复合材料的种类和不同的环境对胶接接头的剪切强度有较大的影响。事实上, 复合材料胶接的性能会因复合材料的种类、胶黏剂的种类、表面处理技术等的不同而有较大差异^[6]。本文仅从环境和复合材料的种类两个方面来分析它们对接头的影响。

5 破坏模式分析

胶接结构界面有 3 种破坏模式, 分别是界面破坏、内聚破坏、混合破坏。其中, 内聚破坏又可分为胶黏剂与被粘材料的内聚破坏, 胶黏剂的内聚破坏指的是胶黏剂本身产生破坏, 被粘物的内聚破坏指的是被粘物本身产生破坏; 界面破坏则指的是胶黏剂与被粘物在胶接界面处分开而产生的破坏; 混合破坏也叫交替破坏, 包括一部分内聚破坏和一部分界面破坏, 即破坏通过胶黏剂在两界面处交替进行^[7]。在工程应用中, 要求复合材料胶接结构的破坏模式以复合材料层压板的

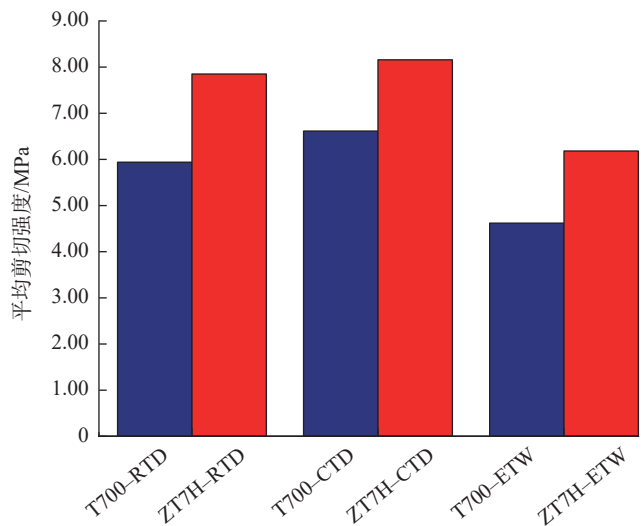


图 2 不同环境下 T700/ZT7H 试验件剪切强度
Fig.2 Shear strength of T700/ZT7H specimens under different environments

内聚破坏为主,在这种情况下,结构承受的剪切载荷最大。而若胶接结构以界面破坏为主时,其胶结强度相对于其他破坏模式明显较低,这是不允许的。造成这种情况有以下几种原因,胶黏剂与被粘接物不匹配、被粘接物表面处理不合格、胶膜太薄或者太厚等。从图3、图4可以看出,RTD 试验件和 CTD 试验件失效破坏发生在层压板表面,层压板表面纤维基体被拔出,这种破坏模式以被粘物的内聚破坏为主;ETW 试验件失效破坏一部分发生在层压板表面,另一部分发生在胶层与层压板之间,失效后此部分胶层几乎全部只附着在其中一块层压板上。ETW 试验件的破坏模式以内聚破坏+界面破坏为主。

6 环境对胶结结构性能的影响

ETW 环境对胶结结构的影响包括对胶黏剂的影响、对被粘接复合材料层压板的影响以及胶膜与层压板之间界面的影响。对于 J299 胶膜来说,湿热会使其发生物理化学反应,从而降低其黏结性能。T700 和 ZT7H 试验件在高温湿态环境下,其纤维和树脂之间因内应力而产生的脱粘和开裂会使层合板的力学性能下降。胶膜与层压板之间界面在湿热环境下,性能衰减更为严重,这是因为大量水分子沿着亲水性的被粘物表面渗透到整个胶接界面后,取代了胶粘剂分子原先在层合板表面上的物理吸附,从而引起胶结强度大幅度下降^[7]。

低温环境下,T700 和 ZT7H 试验件树脂体积收缩,纤维体积几乎不变,树脂的收缩导致对界面压力的增加,从而使界面剪切强度增加^[8],最终 CTD 试验件剪切强度略大于 RTD 试验件。

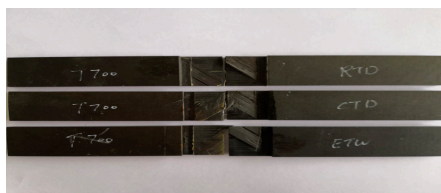


图3 T700试验件不同环境下的破坏模式

Fig.3 Failure mode of T700 specimens under different environments

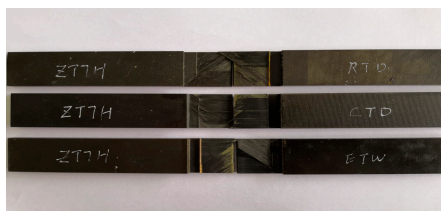


图4 ZT7H试验件不同环境下的破坏模式

Fig.4 Failure mode of ZT7H specimens under different environments

7 复合材料种类对胶接结构性能的影响

不同种类复合材料对胶接结构性能的影响主要包括两个方面,一是复合材料基体树脂与胶黏剂主体树脂的相容性直接影响胶接的界面结构和性能^[9];二是复合材料中碳纤维与树脂界面结合的强弱对复合材料力学性能有着重大的影响^[10-11],界面结合较弱则胶接结构易发生强度较低的内聚破坏。

本文试验件均为双马树脂基复合材料,与 J299 胶膜粘接在一起后具有良好的相容性,并且具有良好的耐高温性,从而使胶膜与层合板之间胶接界面具有较强的力学性能。

碳纤维 T700 和 ZT7H 对与 5429 树脂的界面结合性能与自身形貌有很大关系。T700 碳纤维表面光滑,无表面沉积物和明显的沟槽,而 ZT7H 表面有深浅不一的沟槽存在,这有利于纤维与树脂间的机械啮合作用,可以提高复合材料界面黏结性能^[12]。所以,ZT7H 试验件比 T700 试验件有更好的界面剪切性能,这与试验结果一致。

8 结论

对比 T700 和 ZT7H 胶接接头在 3 种不同环境下拉伸力学性能的试验结果,得出结论如下:

- (1) 复合材料胶接接头的剪切性能不仅和胶膜的性能有关,还与复合材料的种类和外部环境有关;
- (2) J299 胶膜与 5429 树脂具有良好的相容性;
- (3) T700 和 ZT7H 胶接接头在 ETW 环境下的剪切强度均值约为 RTD 环境的 78% 和 79%,在 CTD 环境下的剪切强度均值略为 RTD 环境的 1.11 倍和 1.04 倍;
- (4) 在 RTD、CTD 和 ETW 的环境下,ZT7H 试样胶接接头剪切强度分别是 T700 试样胶接接头强度的 1.32 倍、1.23 倍和 1.34 倍。

参考文献

- [1] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 145-146.
Chinese Aeronautical Establishment. Composite structure design manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001:145-146.
- [2] 张阿盈. 复合材料整体化结合界面失效模拟方法研究 [J]. 航空工程进展, 2013, 4(4): 509-514.
ZHANG Aying. Study on failure simulation of integrated composite bonding interface[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4): 509-514.
- [3] 蔡闻峰, 周惠群, 于凤丽. 树脂基碳纤维复合材料成型工艺现状及发展方向 [J]. 航空制造技术, 2008, 61(10): 54-57.

(下转第 86 页)

of Engineering Thermophysics, 2017, 38(9): 1896–1905.

[6] AUERSWALD C, SENF B, MEHNER J, et al. Closed loop control for shape memory alloy actuators[C]//Proceedings of 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. New York: IEEE, 2014.

[7] FENG Y, RABBATH C A, HONG H, et al. Inverse hysteresis control for shape memory alloy micro-actuators based flap positioning system[C]//Proceedings of American Control Conference (ACC). New York: IEEE, 2010.

[8] KOLYVAS E, KOVEOS Y, TZES A. On the interaction of temperature-sensing, shape memory alloy dynamics, and control design for a bending actuator[C]//Proceedings of 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). New York: IEEE, 2014.

[9] AHN K K, NGUYEN B K. Position control of shape memory alloy actuators using self tuning fuzzy PID controller[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2006, 4(6): 756–762.

[10] AHOLA J, MAKKONEN T, NEVALA K, et al. Comparison of position control algorithms of embedded shape memory alloy actuators[C]//Proceedings of International Conference on Mechatronics. ICM, 2009.

[11] AHN K K, KHA N B. Internal model control for shape memory alloy actuators using fuzzy based Preisach model[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(2): 730–741.

[12] LUO H Y, ABEL E W. A comparison of methods for the training of NiTi two-way shape memory alloy[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2543–2549.

[13] 郝林. 形状记忆合金鼓包力学特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

HAO Lin. Research on mechanical properties of shape memory alloy bump[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[14] 陈远晟. 压电驱动器的迟滞非线性建模与控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

CHEN Yuansheng. Hysteresis modeling and nonlinear control of piezoelectric actuators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[15] 刘旺中, 陈照波, 侯守武, 等. 基于 Preisach 理论的形状记忆合金温度-位移迟滞仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 83–87.

LIU Wangzhong, CHEN Zhaobo, HOU Shouwu, et al. Simulation on modeling of temperature-displacement hysteresis in SMA based on Preisach theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 83–87.

[16] JI K H, PARK H J, PARK Y W, et al. Hysteresis modeling and compensation in a magnetostrictive actuator[J]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, 2013, 8689(43): 10413–10420.

[17] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(15): 1518–1521.

通讯作者: 季宏丽, 博士, 教授, 研究方向为智能材料与结构的减振降噪, E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn.

(责编 思齐)

(上接第79页)

CAI Wenfeng, ZHOU Huiqun, YU Fengli. Current status and development trend of epoxy resin carbon fiber reinforced composites forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 61(10): 54–57.

[4] 陈丽敏, 焦婷, 雷安民, 等. 新型双马结构胶 J299 性能试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 97–100.

CHEN Limin, JIAO Ting, LEI Anmin, et al. Properties test study of new kind of bismaleimide resin J299[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 97–100.

[5] 孙文博, 马玉娥. 填充物、胶膜和 Z-pin 对复合材料 T 型接头强度影响对比 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(1): 110–116.

SUN Wenbo, MA Yu'e. Effects of adhesive, filler and Z-pin on strength of composite T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 110–116.

[6] 乔海涛, 邹贤. 复合材料胶接技术的研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(2): 11–14.

QIAO Haitao, ZOU Xian. Progress of composite bonding technique[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(2): 11–14.

[7] 马海全, 王倩妮, 钱雷, 等. 胶接结构破坏模式及失效机理 [J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 162–166.

MA Haiquan, WANG Qianni, QIAN Lei, et al. Damage mode and failure mechanism of cementing structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 162–166.

[8] 耿立艳. 纳米 SiO₂ 改性环氧树脂及其复合材料低温力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

GENG Liyan. Study on EP resin modified nano-silica and mechanical properties of composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[9] 曲春艳, 王德志, 冯浩, 等. 双马来酰亚胺基碳纤维复合材料胶接用结构胶膜 [J]. 航空制造技术, 2007, 50(S): 118–122.

QU Chunyan, WANG Dezhi, FENG Hao, et al. A structural adhesive film for bonding of carbon fibers reinforced bismaleimide matrix composites[J]. High Performance Composite Structure Manufacturing Technology, 2007, 50(S): 118–122.

[10] HUANG Y D, ZHANG Z Q, TONG Z, et al. Interfacial monitoring during the processing of carbon fiber/PMR-15 polyimide composites[J]. Journal of Materials Process Technology, 1993, 37(1–4): 559–570.

[11] LIN T K, WU S J, LAI J G, et al. The effect of chemical treatment on reinforcement/matrix interaction in Kevlar-fiber/bismaleimide composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(9): 1873–1878.

[12] 李国丽, 彭公秋, 王迎芬, 等. T700 级碳纤维 /QY9611 双马树脂复合材料界面性能研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 93–97.

LI Guoli, PENG Gongqiu, WANG Yingfen, et al. Interfacial properties of T700 grade carbon fibers/QY9611 BMI matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(15): 93–97.

通讯作者: 雷安民, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料结构强度研究, E-mail: boymin1983@163.com.

(责编 思齐)