

环境及其效应

航空用碳纤维增强树脂基复合材料低温环境下弯曲性能变化研究

侯建杰, 熊俊, 朱丽, 罗海林, 向海

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

摘要: **目的** 研究航空用碳纤维增强中温固化环氧树脂基复合材料单向层压板在低温环境下不同试验方式弯曲性能的变化规律。**方法** 通过改变压头半径、跨厚比、以及压头与试样之间有无塑料薄膜衬垫等试验方式, 研究-50℃低温环境下不同试验方法弯曲性能的变化规律。**结果** 低温环境下, 不同的试验方式对碳纤维增强树脂基复合材料弯曲性能测试数据的影响有所不同。当使用塑料薄膜衬垫时, 会显著降低试样上表面压头部位的应力集中, 在低温环境下试样弯曲性能变化最低; 当压头半径减小时, 低温环境对试样弯曲性能影响最显著。**结论** 如需测量温度对试样弯曲性能的影响, 建议选择压头半径较小, 无塑料薄膜衬垫, 跨厚比 L/h 为 32:1 的试验方案。

关键词: 复合材料; 低温环境; 弯曲性能; 压头半径; 塑料薄膜衬垫

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.017

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)07-0094-04

Flexural Properties of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites for Aviation at Low Temperature

GOU Jian-jie, XIONG Jun, ZHU Li, LUO Hai-lin, XIANG Hai

(Aviation Industry Chengdu Aircraft Industry (Group) Co. Ltd, Chengdu 610092, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the bending behavior of unidirectional laminates reinforced with epoxy carbon fiber (CFRP) for aviation at low temperature. Test methods included changing the head radius, L/h ratio and whether there was plastic film liner between the head and the sample. The flexural properties of different test methods at low temperature -50℃ were studied. At low temperature, different test methods had different effects on the flexural properties of carbon fiber reinforced resin matrix composites. The stress concentration in the pressure head position on the upper surface of the specimen was significantly reduced when the plastic film liner was used; the change of flexural property was the lowest in low temperature environment at this moment. When the radius of the head decreased, the low-temperature environment had the most significant influence on the flexural property of the specimen. To measure temperature effect the performance of the sample, it is recommended to choose plastic film-free liner of small radius with $L/h=32:1$.

KEY WORDS: composite materials; low temperature; flexural property; head radius; plastic film gasket

收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-06-03

Received: 2020-05-26; Revised: 2020-06-03

作者简介: 侯建杰(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为复合材料理化性能检测。

Biography: GOU Jian-jie (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: physical and chemical properties testing of composite materials.

碳纤维增强树脂基复合材料主要由树脂基体、碳纤维和上浆剂构成：碳纤维主要承受应力，树脂基体起到传递应力的作用；上浆剂是碳纤维和基体之间的过渡，起到增强树脂和碳纤维粘接强度、改善界面性能的作用。碳纤维增强树脂基复合材料具有高比强度、高比模量，并在耐疲劳性能、抗冲击性能、减震性能、耐腐蚀性能、耐高低温性能等方面都有显著的优点，在航空行业应用广泛^[1-3]。当飞机在高空环境使用过程中，机身将长期服役于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境中，会承受弯曲等多种应力的作用，因此，研究低温环境下的弯曲性能变化具有重要意义^[4-9]。由于复合材料弯曲试验方法的载荷状态复杂，影响因素多，材料同时承受压缩、拉伸和剪切载荷，与拉伸和压缩试验相比，应力状态复杂，加载点附近的应力状态尤为复杂，可能发生的破坏形式多，且基于弯曲梁理论，不能够在计算中体现出剪切影响^[10-15]。为此，文中结合国内外行业标准，分析研究了压头半径、跨厚比、以及压头与试样之间有无塑料薄膜衬垫等因素对碳纤维增强树脂基复合材料低温环境下弯曲性能测试数据的影响规律。

1 试验

1.1 试样制备

原材料为相同工艺条件下制作的中温固化环氧碳纤维增强改性环氧树脂基复合材料单向层压板弯曲试样，如图 1 所示。

1.2 试验过程

将试样在低温环境试验箱中进行 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温试验 3 h 后，使用 5982 型 100 kN 英斯特朗电子万能试

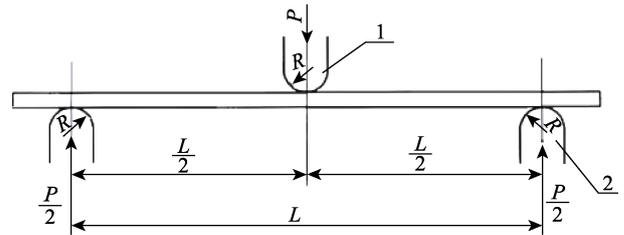


图 1 弯曲试验加载示意

Fig.1 Loading diagram of bending test

验机对其弯曲性能进行测试，并与室温条件下的弯曲性能进行对比。弯曲强度与其破坏形式密切相关，ASTM D 790—2017 规定试样下表面拉伸破坏为有效。影响弯曲试样破坏形式的因素主要包括：压头半径、跨厚比、试样表面状态、试验速率、试样受力状态等。其中，当试验跨厚比 L/h 确定后，试验速度（ $R = ZL^2/6h$ ， Z 为外层纤维的应变速率， $Z=0.01$ ）也随之确定。ASTM D 790—2017 推荐的压头半径为 5 mm，如果发生加压失败或出现明显的压痕，其半径还应更大，加载头的半径最大不超过试样厚度的 4 倍。跨厚比选择应以三点弯曲试样纵向拉伸破坏和层间剪切破坏同时发生的临界跨厚比 $L/h = \sigma/2\tau_b$ 为依据，由此确保试样弯曲破坏首先发生在最外层纤维层来确定。对于复合材料，其面内剪切强度较低，而平行于支撑跨距的抗拉强度相对较高，ASTM D 790—2017 推荐采用跨厚比 32:1，但要求失效模式为外表面拉伸破坏，允许调整跨距。弯曲强度试验中，压头与试样刚性接触，过度应力集中将引起材料过早失效。文中结合 ASTM D 790—2017 试验方法，采用三点弯曲试验方法对复合材料层压板施加载荷，在试样中央或中间部位形成弯曲应力分布场，测试层压板的弯曲性能，试验方案见表 1。

表 1 弯曲强度测试方案

Tab.1 Test scheme for bending strength

试验方案	跨厚比(L/h)	压头半径/mm	有无塑料薄膜衬垫	试样放置方式（工装面向上、袋面向上）	
室温与低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对比	压头半径影响	60:1	5	无	袋面向上
		60:1	10	无	袋面向上
	跨厚比影响	32:1	5	无	袋面向上
		40:1	5	无	袋面向上
		60:1	5	无	袋面向上
塑料薄膜衬垫影响	32:1	5	有	袋面向上	

1.3 数据处理

根据 ASTM D 790—2017 计算其室温及低温环境下不同试验方式的弯曲性能。

弯曲强度计算公式为：

$$\sigma_f = 3PL / (2b \times h^2) \quad (1)$$

式中： σ_f 为弯曲强度，MPa； P 为试样破坏时的

最大载荷，N； L 为支撑跨距，mm； b 为试样宽度，mm； h 为试样厚度，mm。

2 结果与讨论

2.1 改变压头半径

当跨厚比 $L/h=60:1$ 、试样袋面向上以及压头与试

样之间无塑料薄膜衬垫时,其他条件相同的情况下,分别对5个试样在压头半径 R 为5、10 mm的情况下进行室温及低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 弯曲性能测试,试验结果见表2。从表2中可以看出,随压头半径的增加,弯曲强度略有增加,但波动性变小。 $R=5\text{ mm}$ 时的破坏形式为部分压头处破坏,部分下表面拉伸破坏,低温环境

比室温环境平均弯曲强度下降15%左右。 $R=10\text{ mm}$ 时的破坏形式均为试样中间断裂,低温环境比室温环境平均弯曲强度下降8%左右。这是由于压头半径小时,压头与试样接触面积减小,应力较为集中,因此很容易引起压头处材料的过早破坏从而导致低温对其弯曲性能影响较大。

表2 低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与室温环境下不同压头半径对弯曲性能的变化 ($L/h=60:1$)
Tab.2 Change of flexural property at low temperature $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and room temperature when changing the radius of head ($L/h=60:1$)

试验温度	压头半径 R/mm	弯曲强度/MPa						下降率/%
		试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	平均值	
室温	5	1429.8	1359.7	1305.2	1411.5	1425.6	1386.36	—
	10	1401.3	1449.6	1401.0	1442.3	1438.5	1426.54	
$-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	5	1248.9	1180.6	1010.3	1195.4	1209.5	1168.94	15.7
	10	1250.6	1392.5	1374.2	1301.7	1210.3	1305.86	8.5

2.2 改变跨厚比

在压头半径 $R=5\text{ mm}$ 、试样袋面向上以及压头与试样之间无塑料薄膜衬垫时,其他条件相同的情况下,分别对5个试样在跨厚比 L/h 为32:1、40:1和60:1的条件下进行室温与低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 弯曲性能对比,试验结果见表3。从表3中可以看出,随着跨厚比的增加,弯曲强度均值成递增趋势,且弯曲强度波动性变小。 L/h 为32:1和40:1时,失效形式为试样中部断裂; $L/h=60:1$ 时,失效形式为部分压头处破坏,下表面未断,部分下表面拉伸破坏,随着温度的降低,弯曲性能也有不同的变化。这是由于随着跨厚比的增加,试

样的弯曲强度也不断增加,而剪应力却逐步下降;温度对不同跨厚比时弯曲性能的影响不大。

2.4 增加塑料薄膜衬垫

在压头半径 $R=5\text{ mm}$ 、试样袋面向上、 $L/h=32:1$ 时,其他条件相同的情况下,分别对5个试样增加塑料薄膜衬垫(单层),在室温及低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行弯曲性能测试,试验结果见表4。由表4中可以看出,当使用塑料薄膜衬垫时,试样的弯曲强度均值均明显增加,低温环境下的试样弯曲强度变化不明显,且试样的失效形式均表现为下表面拉伸破坏。

表3 低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与室温环境下不同跨厚比时弯曲性能的变化
Tab.3 Change of flexural property at low temperature $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at room temperature with different L/h

试验温度	L/h	弯曲强度/MPa						下降率/%	破坏形式
		试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	平均值		
室温	32:1	1301.4	1260.9	1326.4	1103	1220	1242.34	10	试样均为中部断裂
	40:1	1233.9	1323.3	1434.9	1378.9	1358.7	1345.94	9	
	60:1	1468.2	1349.6	1307.6	1429.9	1438	1398.66	8.65	
$-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	32:1	1170.3	1128.6	1187.2	987.4	1113.3	1117.36	10	试样均为中部断裂
	40:1	1122.8	1204.2	1305.8	1254.8	1236.4	1224.81	9	
	60:1	1346.5	1230.2	1193.8	1305.5	1312.2	1277.64	8.65	

表4 低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与室温环境下增加塑料薄膜衬垫时弯曲性能的变化
Tab.4 Change of flexural property at low temperature $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at room temperature with plastic film gasket

试验温度	弯曲强度/MPa						下降率/%	破坏形式
	试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	平均值		
室温	1728.2	1514.4	1526	1609.5	1556.5	1586.92	2	均为下表面拉伸破坏
$-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	1693.6	1484.1	1495.5	1577.3	1525.4	1555.2		

3 结论

通过试验可以得出以下结论。

1) 随着温度的降低, 高分子基体变脆, 试样韧性下降, 因此导致弯曲性能降低。如需测量温度对试样弯曲性能的影响, 建议选择压头半径较小, 无塑料薄膜衬垫, 跨厚比 L/h 为 32:1 的试验方案。

2) 压头半径的大小直接影响到试验过程中剪切力对试验结果的影响, 压头半径小时, 很容易引起压头处材料的过早破坏而影响弯曲强度, 有时甚至可以使承压处材料产生挤压-剪切破坏, 且低温对压头半径小的试样影响最为显著。

3) 对于复合材料, 其面内剪切强度较低, 而平行于支撑跨距的抗拉强度相对较高, 增大跨距将使弯曲强度值增加, 但未发生明显变化。适当地增加跨厚比, 可防止试样的外层纤维出现过早破坏, 提升纤维在试样表面仅仅由于弯曲力矩而破坏的概率。

4) 增加一层塑料薄膜衬垫会显著降低试样上表面压头部位的应力集中, 试样更容易发生下表面拉伸破坏, 获得较高的弯曲强度。且增加塑料薄膜后, 低温环境对试样弯曲性能影响最小。

参考文献:

- [1] 王绍凯, 马绪强, 李敏, 等. 飞行器结构用复合材料四大核心技术及发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 76-84.
WANG Shao-kai, MA Xu-qiang, LI Min, et al. Four Key Technologies of Structural Composites for Aircraft Applications and Its Development[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 76-84.
- [2] 何楠, 杨加斌, 高峰. 先进复合材料在军用无人机上的应用动向[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(2): 94-97.
HE Nan, YANG Jia-bin, GAO Feng. Application Tendency of Advanced Composite Materials for Military Unmanned Aerial Vehicles[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(2): 94-97.
- [3] 施琪, 吴亚平, 王利霞, 等. 碳纤维复合材料层合板抗弯性能试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(4): 58-60.
SHI Qi, WU Ya-ping, WANG Li-xia, et al. Experimental Study of Anti-bending Capability of Carbon Fiber Composite Multi-plywood[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University. 2009, 28(4): 58-60.
- [4] 张子龙, 向海. 航空非金属材料性能测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 94-98.
ZHANG Zi-long, XIANG Hai. Performance Testing Technology of Aviation Nonmetal Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 94-98.
- [5] 风和. 高分子材料力学试验[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 122-141.
FENG He. Mechanical Test of Polymer Materials[M]. Beijing: Science Press, 1987: 122-141.
- [6] 赖恩·哈里斯. 工程复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 112-113.
HARRIS Ryan. Engineering Composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 112-113.
- [7] 石庆华, 曹正华. 无人机复合材料设计/制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2010(24): 40-43.
SHI Qing-hua, CAO Zheng-hua. Key Technology of Composites Design and Manufacturing for UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24): 40-43.
- [8] 映红, 赵智姝, 韩勳. 复合材料在飞机结构上的广泛应用[J]. 装备制造技术, 2011(4): 138-140.
YING Hong, ZHAO Zhi-shu, HAN Meng. The Wide Application of Composite Material in the Aircraft Structure[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(4): 138-140.
- [9] 陈绍杰. 无人机上复合材料的应用与研究[J]. 飞机设计, 2003(3): 26-30.
CHEN Shao-jie. Application and Research of Composite for UAV[J]. Aircraft Design, 2003(3): 26-30.
- [10] BARRY B. Unmanned Composite Aircraft Patrol the Skies[J]. High-performance Composite, 2002(5): 18-22.
- [11] 刘小华, 曾志伟. 碳纤维复合材料表面裂纹与纤维弯曲无损检测的发展现状与展望[J]. 工艺设计改造及检测检修. 2017(5): 43-44.
LIU Xiao-hua, ZENG Zhi-wei. Development Status and Prospect of Nondestructive Testing for Surface Cracks and Fiber Bending of Carbon Fiber Composites[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2017(5): 43-44.
- [12] MIZUKAMI K, MIZUTANI Y, TODOROKI A, et al. Detection of In-plane and Out-of-plane Fiber Waviness in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Composites Using Eddy Current Testing[J]. Composites Part B, 2016, 86: 84-94.
- [13] 杨玉娥, 闫天婷, 任保胜. 复合材料中碳纤维方向和弯曲缺陷的微波检测[J]. 航空材料学报, 2015, 35(6): 91-96.
YANG Yu-e, YAN Tian-ting, REN Bao-sheng. Microwave Evaluation of Direction and Bending Defect of Carbon Fiber in Composite Material[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(6): 91-96.
- [14] YANG R, HE Y. Polymer-matrix Composites Carbon Fibre Characterization and Damage Inspection Using Selectively Heating Thermography (SEHT) through Electromagnetic Induction[J]. Composite Structures, 2016, 140: 590-601.
- [15] 鲍子贺, 牛一凡, 严炎, 等. 混杂纤维复合材料力学性能及其低速冲击性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(8): 80-84.
BAO Zi-he, NIU Yi-fan, YAN Yan, et al. Investigation on the Mechanical and Low Velocity Impact Properties of Hybrid Composite Materials[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(8): 80-84.