复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 28 卷 第 3 期 6 月 2011 年
Vol. 28 No. 3 June 2011

文章编号：1000-3851(2011)03-0180-05

国产 CCF300/双马树脂层合板高温拉伸与压缩性能试验研究

汪源龙[1]，程小全*[1]，范 舟[1]，高宇剑[1]，陈 纲[2]

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191；2. 北京电子工程总体研究所，北京 100854)

摘 要： 对碳纤维(CCF300)/双马树脂(GW-300)复合材料层合板进行了 200 ℃和 300 ℃高温环境下的拉伸和压缩性能试验，研究其在不同温度环境下基本力学性能的变化。研究结果表明，由基体控制试件在高温下的拉伸强度和模量比由纤维控制试件降低的比例大；随着温度的升高，厚试件的压缩强度比薄试件的压缩强度提高幅度明显；高温下，拉伸性能保持率较高，而压缩性能保持率较低；300 ℃下基体控制试件和纤维控制试件的拉伸强度保持率分别达 70%以上和 90%以上，而厚试件和薄试件的压缩强度保持率都只略高于 30%。

关键词： 国产碳纤维 CCF300；高温环境；拉伸强度；压缩强度；模量

中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Experimental study on tensile and compressive properties of domestic CCF300/bismaleimide laminates at high temperatures

WANG Yuanlong[1], CHENG Xiaoquan*[1], FAN Zhou[1], GAO Yujian[1], CHEN Gang[2]

(1. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing Institue of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: The tensile and compressive performance of carbon fiber(CCF300)/bismaleimide (GW-300) laminates were experimentally studied at 200 ℃ and 300 ℃. It is found that the tensile strength and modulus of the laminates controlled by the resin decrease more than those controlled by the fibers. The compressive strength of the thick laminates increases more than that of the thin laminates with temperature rising. The retention rate of tensile performance is high, while it is low for the compressive performance at high temperature. The retention rate of tensile strength of the laminates controlled by the resin and fibers are more than 70% and 90%, respectively, at 300 ℃, while both of the retention rate of compressive strength of thick and thin laminates are a little more than 30%.

Keywords: domestic carbon fiber CCF300; high temperature condition; tensile strength; compressive strength; modulus

复合材料具有高比强度、高比模量、耐腐蚀等优良特性，在航空航天领域得到了越来越广泛的应用。国内外航空航天工业目前采用较多的是碳纤维/环氧树脂复合材料，其耐热性较差，无法满足某些在高温下工作的要求[1]。碳纤维(CCF300)/双马树脂(GW-300)复合材料使用国产高性能碳纤维 CCF300 作为增强相，GW-300新型耐高温双马树脂作为基体，其具有较好的耐高温性。

碳纤维是最常用也是最重要的增强体，广泛应用于航空航天和民用工业等各个领域。国外的碳纤维，尤其是日本东丽公司生产的 T300、T700 等一系列高性能碳纤维，成为世界公认标准宇航级碳纤维[2-3]。我国碳纤维的研制与生产水平日益提高，已能生产相当于日本 T300 的性能稳定的碳纤维。国产碳纤维和日产 T300 的微晶结构参数基本相近，石墨化程度略高，因此其模量略高，但强度略低。GW-300是一种双马来酰亚胺树脂(BMI)，该树脂与环氧树脂相比，具有更好的热稳定性。当所需的湿热性能或者热稳定性超过环氧树脂的极限时，BMI 是一个很好的选择[4]。

目前，国内外有关复合材料层合板 200 ℃以上

收稿日期： 2010-06-12；**收修改稿日期：** 2010-10-19

通讯作者： 程小全，教授，博士生导师，主要从事复合材料结构设计技术方面的研究 E-mail：xiaoquan_cheng@buaa.edu.cn

高温性能的研究报道较少。随着空天飞行器事业的发展，耐高温材料及其高温性能的研究工作须先行开展。因此，对碳纤维/双马树脂耐高温(200 ℃和300 ℃)环境下复合材料层合板基本力学性能进行研究，可为该材料在高温条件下的应用奠定一定的基础。本文作者根据航天结构的实际使用情况，对CCF300/GW-300复合材料层合板的拉伸和压缩性能进行试验研究，为高温环境下复合材料结构性能的计算提供数据。

1 试 验

1.1 试 件

200 ℃以上高温环境下层合板拉伸和压缩力学性能试验目前还没有相应的标准，本文中参考标准ASTM D3039[4]和 ASTM D3410[5]分别进行层合板拉伸和压缩力学性能试验。

高温环境下试件通常只能采用机械夹头夹持，在加温过程中试件的夹持力可能会不断变小，因此将高温拉伸试件设计成哑铃形。压缩试件在高温环境下刚度会变小，容易发生屈曲破坏，因此将压缩试件设计得比较厚。高温拉伸和压缩试件如图 1 所示。常温下的拉伸和压缩试件按以上两个标准设计。试件的铺层形式如表 1 所示。拉伸试验有试件A(纵向)和试件 B(横向)两种铺层形式，压缩试验有试件 C、试件 D 两种铺层形式，试件 D 比试件 C 多 6 层。铺层的单层厚度为 0.15 mm。

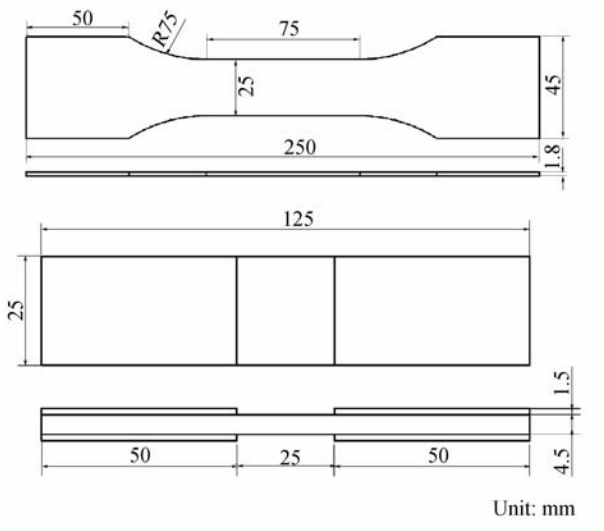

图 1 高温拉伸(上)和压缩(下)试件

Fig. 1 Tensile(top) and compressive (bottom) specimen for high temperature test

表 1 CCF300/GW-300试件及其铺层

Table 1 CCF300/GW-300 specimens and their ply sequences

Specimens	Testing type	Ply sequences
A	Longitudinal tension	[±20/0/±45/0]s
B	Transverse tension	[∓70/90/∓45/90]s
C	Compression	[± 20/0/± 45/02/± 45/90/±45/0/±45]s
D	Compression	[± 20/0/± 45/02/± 45/90/±45/0/±45/0/±45]s

每种试件都要进行常温、200 ℃和 300 ℃三种温度环境下的力学性能测试，每种试验情况的试样数至少为 5 个。

1.2 加载与测量设备

实验加载在 INSTRON 8802 电液伺服材料试验机上进行，加载速率为 2 mm/min，加温设备为试验机自配的环境箱，加温速度为 30 ℃/min，其最高使用温度为 350 ℃。常温下的应变使用北航研制的BZY-2应变仪测量。

1.3 拉伸模量测试

常温下的模量测试按 ASTM 标准要求，通过应变片测量不同应力下的应变值，做出应力-应变曲线，拟合曲线的斜率求得模量。

200 ℃以上的高温环境下，国产应变片的性能很难满足要求，如果采用进口的高温应变片，试验费用非常高。因此，本文中采用了间接方法测试这些试件的模量。

在高温环境下，虽然不容易测量应变的变化情况，但是可以得到试样的位移变化值，因此考虑使用载荷-位移(P-δ)曲线来间接求得拉伸模量，这也是使用哑铃形拉伸试件的原因之一。为了使实验结果尽量准确，采用下式来计算试件的高温弹性模量：

$$E_x = \frac{k_x}{k_0} \times E_0 \tag{1}$$

式中：E_x— 高温下的拉伸模量；E_0— 常温下的拉伸模量，通过实验测得的σ-ε 曲线获得；k_x— 高温下试件P-δ 曲线的斜率；k_0— 常温下试件P-δ 曲线的斜率。其中，高温和常温下的P-δ 曲线的斜率均选择初始直线段的斜率。

2 实验结果与分析

2.1 拉伸强度

层合板拉伸强度如表 2 所示。试件 A 载荷方

表 2　CCF300/GW-300层合板的拉伸强度

Table 2　Tensile strength of CCF300/GW-300 laminates

Temperature/℃	A		B	
	Average/MPa	CV/%	Average/MPa	CV/%
RT	511.26	7.02	110.38	2.31
200	491.44	6.57	101.42	10.96
300	504.94	4.85	80.21	11.60

RT—Room temperature; CV—Coefficent of variation.

向的铺层比例较大，试件的拉伸强度主要由纤维控制，而纤维的拉伸强度受温度的影响很小。因此，200 ℃和 300 ℃高温情况下的拉伸强度比常温时的强度下降较少，甚至出现了 300 ℃的拉伸强度比 200 ℃的拉伸强度稍大的现象。试件 B 垂直载荷方向的铺层比例较大，其拉伸强度主要是由基体控制，因此随着温度的增加，它们的拉伸强度不断减少。GW-300树脂的玻璃化温度为 230 ℃，因此，300 ℃时拉伸强度的下降幅度比 200 ℃时的大。

温度从 200 ℃升至 300 ℃时，试件 B 的拉伸强度下降了 21.21 MPa，而从常温加热至 200 ℃时的强度降却仅为 8.96 MPa，前者约为后者的 2.4 倍。GW-300树脂的平均热失重在 100 ℃和 200 ℃时分别为 0.3%和 1.5%，而到了 300 ℃时则高达 8.0%[1]。这说明温度从 200 ℃上升到 300 ℃时，GW-300树脂的耐热性有着较大衰减，进而导致拉伸强度下降较大。

然而，高温环境下层合板拉伸强度的保持率(高温试件质量/常温试件质量)总体上都比较高，即使性能降低较大的试件 B 在300 ℃下也有 72.67%的保持率，其它情况则都在 90%以上。高温下试件 A 试验数据的离散度要比试件 B 的试验数据离散度小，说明高温下试件 A 的拉伸性能比试件 B 的稳定。

2.2　拉伸模量

CCF300/GW-300层合板的拉伸模量如表 3 所示。试件 A 测试了常温、100、200、300 ℃ 四种温度下的拉伸模量，而试件 B 层合板测试了常温、60、100、200、300 ℃ 五种情况下的拉伸模量。试件 A 的拉伸模量随温度的升高不断降低，但降低的幅度越来越小，而且 300 ℃时的模量反而比 200 ℃时的大。60 ℃试件 B 时的拉伸模量比 100 ℃时的稍低，可认为是试验误差引起的。总的来讲，试件 B 随温度的升高降低的幅度越来越大，这同样是由于该层合板的性能由基体控制造成的。

表 3　CCF300/GW-300层合板的拉伸模量

Table 3　Tensile modulus of CCF300/GW-300 laminates

Temperature/℃	A		B	
	Average/GPa	CV/%	Average/GPa	CV/%
RT	79.41	8.20	13.60	8.41
60	—	—	12.97	1.71
100	74.61	5.96	13.12	1.45
200	70.73	4.89	12.43	1.66
300	72.10	9.10	11.26	3.39

RT—Room temperature; CV—Coefficent of variation.

图 2 给出了试件 B 在 300 ℃高温下拉伸的P-δ曲线。可以看出，只有到接近破坏时，试件才发生较大的损伤，说明该层合板的高温拉伸性能比较稳定。

高温下层合板拉伸模量的保持率均在 80%以上。在同一温度下，试件 A 的拉伸模量相对于常温时降低的比例比试件 B 要低，这同样是由于树脂在高温下刚度的降低比纤维的要大。两种试件拉伸模量的离散度都比较小，说明层合板的弹性模量比较稳定。

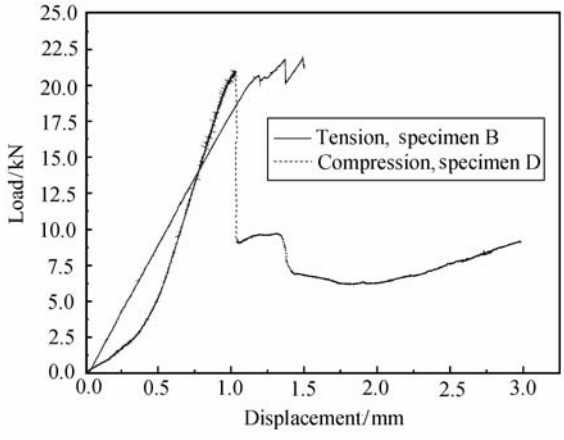

图 2　300℃高温下试件 B 和 D 的载荷-位移曲线

Fig. 2　Load-distance curves of specimen B and D at 300 ℃

2.3　拉伸破坏形式

常温、200 ℃和 300 ℃时，试件 A 的表面铺层都会发生大面积的分层，试件的断裂位置大都在试件中央，为“V”字形断口，属于正常破坏形式。试件 B 层合板在三种温度下，表面铺层相对完好，没有严重的分层现象，断口也是“V”字形，断裂位置分布较为分散，约有一半的试样断口靠近试件夹持端，但均在试验段范围内，也属于正常破坏形式，

如图 3 所示。300 ℃时，两种试件的破坏程度都比 200 ℃时严重。

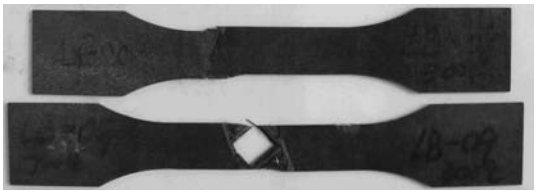

图 3　300 ℃时试件 B 的破坏形式

Fig. 3　Failure form of specimen B at 300 ℃

2.4　压缩强度

CCF300/GW-300层合板的压缩强度试验结果如表 4 所示。200 ℃和300 ℃时试件 C 压缩强度保持率分别为 70.77%和 31.25%，试件 D 分别为70.76%和 33.21%。可见，两种试件随温度上升其压缩强度下降幅度较大，而且比例基本一致。试件 C 从常温上升到200 ℃时压缩强度降低了108.77 MPa，从200 ℃上升到 300 ℃ 时压缩强度降低了 147.08 MPa，后者是前者的 1.35 倍。而试件 D 从常温上升到200 ℃时压缩强度降低了 111.49 MPa，从 200 ℃上升到300 ℃时压缩强度降低了 143.14 MPa，后者是前者的 1.28 倍。由此可见，试件 C 和试件 D 随温度增加其压缩强度降低的幅度都略有增加，且增加比例相近。

表 4　CCF300/GW-300层合板的压缩强度

Table 4　Compressive strength of CCF300/GW-300 laminates

Temperature/℃	C		D	
	Average/MPa	CV/%	Average/MPa	CV/%
RT	372.17	5.39	381.26	4.36
200	263.40	6.44	269.77	4.85
300	116.32	17.24	126.63	14.29

RT—Room temperature; CV—Coefficent of variation.

在常温、200 ℃和 300 ℃环境下，试件 D 比试件 C 的压缩强度分别增加 2.44%、2.42% 和 8.86%。由此可见，温度越高，增厚铺层对压缩强度的加强作用也越明显。两种铺层层合板压缩强度数据的离散度在常温和 200 ℃下比较小，但 300 ℃时离散度比较大。这说明从 200 ℃升温至 300 ℃时，层合板性能的稳定性大幅度降低，这与基体的高温性能相关。

2.5　压缩破坏形式

常温下试件 C 和 D 的压缩破坏都发生在试件的中央，属于正常破坏位置；表面铺层破坏严重，有大面积的分层。200 ℃情况下，两种试件的断裂位置大多在试件的中央，属正常的破坏位置，如图 4 所示。而 300 ℃的情况下，试件断裂位置大多不在中央而在试件的夹持段，属于非正常破坏位置。因此，这时的强度值不是该情况的真实压缩强度。200 ℃和 300 ℃下试件表面铺层都出现了破坏，并有分层出现。两种铺层层合板的破坏形式基本相同。

图 4　200 ℃试件 D 的破坏形式

Fig. 4　Failure form of specimen D at 200 ℃

从图 2 所给的试件 D 在 300 ℃高温下压缩的 P-δ曲线中可以看出，试件的压缩模量在压缩过程中是变化的，其破坏过程也表现得比较复杂。在位移到 0.5 mm 之后，曲线出现斜率变化是由于高温时压缩夹面与试件之间会打滑，无法直接通过夹紧试件加载，必须在两端加端头垫块顶住试件。数据记录开始的时候压缩试件顶端还没有压实。计算模量采用的是位移 0.5 mm 之后直线段的斜率。

2.6　高温对层合板常温拉伸性能的影响

为了研究高温对复合材料层合板常温拉伸性能的影响，将试件加热至 200 ℃或300 ℃并保温 5 min 后，再自然冷却到常温测其拉伸强度，实验结果如表 5 所示。每种高温情况至少两个试样，表中所给强度为其均值。由表可见，高温处理后层合板的拉伸强度与常温时的强度值相当，说明高温对其拉伸强度影响不大。试件 A 的拉伸模量对高温不敏感，但 B 试件受高温的影响较大，特别是300 ℃高温情况，拉伸模量比常温情况降低了 30%，说明由基体控制层合板的模量对高温比较敏感。

表 5　高温冲击对层合板拉伸性能的影响

Table 5　Effect of high temperature impact on tensile modulus and strength of the laminates

Specimens	Tensile modulus/GPa			Tensile strength/MPa		
	RT	200 ℃	300 ℃	RT	200 ℃	300 ℃
A	79.41	81.59	78.59	511.26	505.24	519.84
B	13.60	12.79	9.51	110.38	97.55	106.14

RT—Room temperature

3 结　论

(1) 高温下由基体控制层合板(试件 B)的拉伸强度比由纤维控制层合板(试件 A)的降低比例要大，但强度保持率总体上较高。从 200 ℃到 300 ℃时，试件 B 的拉伸强度降低值是常温到 200 ℃时的 2.4 倍。

(2) 高温下由基体控制层合板(试件 B)的拉伸模量比由纤维控制层合板(试件 A)的降低比例要大。试件 A 的拉伸模量随温度的升高减小的幅度越来越小，试件 B 拉伸模量随温度的升高减小的幅度越来越大。

(3) 随着温度的升高，由基体和纤维控制两种层合板压缩强度的降低幅度都在增加。与拉伸相比，压缩强度高温下的保持率较低。随着温度的升高，厚层合板的加强作用比较明显。

(4) 高温对层合板的拉伸强度影响不大，对由纤维控制层合板(试件 A)的拉伸模量影响也不大，但对由基体控制层合板(试件 B)的拉伸模量影响较大。

参考文献：

[1] 蒋文革，蒋元兴，耿东兵. T300/GW-300新型耐高温碳纤维复合材料工艺研究 [C]// 复合材料——生命、环境与高技术，2002：655-659.

[2] 黎小平，张小平，王红伟. 碳纤维的发展及其应用现状[J]. 高科技纤维与应用，2005，30(5)：24-30.
Li Xiaoping，Zhang Xiaoping，Wang Hongwei. Progress in development and application of carbon fiber [J]. Hi-tech Fiber & Application，2005，30(5)：24-30.

[3] 赵稼祥. 东丽公司碳纤维及其复合材料的进展 [J]. 宇航材料工艺，2000(6)：53-56.
Zhao Jiaxiang. Development of carbon fiber and composites in Toray [J]. Aerospace Materials & Technology，2000(6)：53-56.

[4] American Material and Experimental Association. ASTM D3039 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite material [S]. West Conshohocken，United States：American Material and Experimental Association，2002.

[5] American Material and Experimental Association. ASTM D3410 Standard test method for Compressive properties of polymer matrix composite material with unsupported gage section shear loading [S]. Wesst Comshohocken，United States：American Material and Experimental Association，2002.

[6] Michael C Y N. Composite airframe structures [M]. Hong Kong：Conmilit Press Ltd，2008：50-51.

[7] 杨玉蓉，杨永生，华　中，刘　新. T300与国产PAN基碳纤维的结构和性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料，2009(3)：36-40.
Yang Yurong，Yang Yongsheng，Hua Zhong，Liu Xin. Structure and properties of T300 and domestic pan-based carbon fiber [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2009(3)：36-40.

[8] 梁国正，蓝立文，顾媛娟. 改性双马来酰亚胺树脂的研究 [J]. 复合材料学报，1995，12(1)：1-5.
Liang Guozheng，Lan Liwen，Gu Yuanjuan. Modification of bismaleimide resin [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，1995，12(1)：1-5.

[9] 郭　慧，黄玉冬，刘　丽，王　磊. T300和国产碳纤维本体的力学性能对比及其分析 [J]. 宇航学报，2009，30(5)：2068-2070.
Guo Hui，Huang Yudong，Liu Li，Wang Lei. Comparison of mechanical property of unsized T300 and Chinese carbon fibers [J]. Journal of Astronutics，2009，30(5)：2068-2070.

[10] 刘　越. 碳纤维增强复合材料性能影响因素的探讨 [J]. 高科技纤维与应用，2003，28(2)：29-33.
Liu Yue. Study on the factors affecting the properties of CF reinforced composites [J]. Hi-tech Fiber & Application，2003，28(2)：29-33.

[11] 袁海根，曾金芳，杨　杰，熊艳丽. 防热抗烧蚀复合材料研究进展 [J]. 化学推进剂和高分子材料，2006，4(1)：21-25.
Yuan Haigen，Zeng Jinfang，Yang Jie，Xiong Yanli. Research progress of high temperature thermoprotective and ablation resistant composite materials [J]. Chemical Propellant & Polymetric Materials，2006，4(1)：21-25.