

考虑温度环境下树脂基复合材料力学性能及模型研究

宋 健¹, 温卫东^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院
江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 采用试验的方法研究了 T300/QY8911-Ⅳ 复合材料不同温度环境(室温、160, 200, 260 ℃)下的纵向拉伸、横向拉伸及面内切变力学性能, 探讨了材料的模量、强度随温度变化的规律并提出了相应的力学模型. 试验结果表明: 在室温至 200 ℃ 复合材料纵向拉伸模量、强度受温度影响较小, 拉伸模量最大变幅为 2.82%, 强度为 1.41%; 当温度升高到 260 ℃ 时, 由于树脂基体变质, 材料纵向拉伸模量与强度均下降, 模量下降 5.85%, 强度下降 7.01% (均相对 200 ℃); 横向拉伸和面内切变模量、强度受温度的影响较大, 在 160 ℃ 范围内, 材料的平均模量分别下降了 49.21% 和 70.34%, 强度下降了 38.49% 和 44.85%. 当温度升至 200 ℃ 时, 材料的横向拉伸及面内切变模量与强度进一步下降, 模量降幅为 25.13% 和 38.30%, 强度降幅为 0.41% 和 15.95%. 拟合结果表明: 3 个力学模型均适用于不同温度、载荷类型下的数据分布规律, 但模型Ⅱ与模型Ⅲ对数据的拟合更准确.

关 键 词: 复合材料; 高温试验; 强度; 模量; 力学模型

中图分类号: V231 **文献标志码:** A

Study on mechanical properties of resin composites and models considering temperature environment

SONG Jian¹, WEN Wei-dong^{1,2}

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The longitudinal tensile, transverse tensile and in-plane shear mechanical properties of T300/QY8911-Ⅳ composites were initially investigated at different temperatures (room temperature, 160, 200, 260 ℃). The variation rules of modulus and strength as the function of temperature were then discussed, and the corresponding mechanical models were proposed. The test results showed that the longitudinal modulus and strength were less affected by temperature at the range of 200 ℃. The maximum amplitude was only 2.82% and 1.41%, compared with the average value (room temperature). Due to the resin matrix deterioration, the longitudinal tensile performance was decreased by 5.85% and 7.01% (260 ℃), respectively. The properties of transverse tensile and in-plane shear were

significantly affected by temperature. The modulus of transverse and in-plane shear were reduced by 49.21%, 70.34% and the corresponding strengths declined by 38.49%, 44.85% (160 °C) with respect to the average modulus (room temperature). The modulus properties mentioned above continued to decline by 25.13%, 38.30% (200 °C) and the strength dropped by another 0.41%, 15.95%, respectively. The fitting results manifest that the three mechanical models are suitable to fit the data obtained by different temperatures and loads, while the model II and III are more accurate.

Key words: composites; elevated temperature test; strength; modulus; mechanical model

随着纤维增强树脂基复合材料被成功应用到航空航天领域,不可避免的要开展环境因素对树脂基复合材料力学性能影响的研究,特别是高温环境的影响。目前,国外已有一些学者开展了高温环境对树脂基复合材料影响的试验研究并提出了有限的半经验模型^[1-4],但国内由于材料、工艺及经费等原因研究的还不多。Mivehchi 等人^[1]提出了一个基于对数函数的拟合模型,并采用该模型预测了不同温度下复合材料的力学性能。Ha 等人^[2-3]在研究复合材料高温性能时,提出了一种幂函数拟合模型,并对高温下的数据进行了拟合。Odegard 等人^[5]在研究纤维增强树脂基单向复合材料层板时,应用 Ha 提出的幂函数公式对数据进行了拟合,并且通过引入修正因子的方法,进一步预测了高温下此复合材料偏轴拉伸力学性能^[6]。Jen 等人^[4, 7-9]研究了 AS-4/PEEK 树脂基复合材料正交层板和准各向同性层板在室温至 150 °C 以内的疲劳性能,并提出了一种改进的应力-寿命-温度(S-N-T)模型,通过试验发现,高温下正交层板的疲劳强度要低于准各向同性层板,但疲劳模量要高于准各向同性层板;从模型预测结果来看,准各向同性层板要优于正交各向异性层板。Rupnowski 等人^[10]通过有限元法对 T650/PMR-15 复合材料在高温环境下的力学性能进行了预测,通过与试验结果对比验证了有限元分析的正确性。Rupnowski 等人在文献[11]中对高温环境下 T650/PMR-15 二维机织复合材料的切变性能进行了有限元分析研究,通过对比试验应力-应变曲线,验证了有限元仿真的正确性。Kawai 等人^[12-14]研究了在 0 °C 和 100 °C 环境下单向及二维机织树脂基复合材料的偏轴拉伸力学特性,通过试验发现:在相同温度下,随着偏轴角度的增加,材料的纵向模量与强度均明显下降,但当相同偏轴角度时,材料的纵向强度的变化存在

波动,并针对二维机织复合材料提出了一种考虑温度影响下的力学性能预测模型。Jen 等人^[4]对两类树脂基复合材料层合板(正交、准各向同性层合板)进行了考虑温度的(室温 20~150 °C)疲劳试验研究,并基于试验结果提出了考虑温度下正交及准各向同性层合板疲劳寿命半经验公式。

国内学者对高温环境对树脂基复合材料性能影响的研究不多,且大多集中在采用试验方法研究湿热对复合材料的影响^[15-18]。李嘉禄等人^[15]研究了不同温度下树脂基层合板的拉伸特性及影响规律,研究结果表明随着温度的升高,树脂基复合材料的拉伸强度不断下降,造成的原因可归结于温度使树脂基体破坏,使得层合板发生了分层破坏,导致性能下降。彭雷等人^[16]研究了湿热、紫外环境对 T300/QY8911 含孔单向层合板静力学性能的影响,试验结果表明孔板的拉伸强度受湿热影响较小,但压缩强度在吸湿后却明显下降,另外紫外线对孔板的强度有提升作用,文中并没有对这一反常现象进行更细致的研究。冯青等人^[17]采用试验的方法研究了湿热条件对碳纤维/环氧树脂基复合材料层间切变性能的影响。试验结果表明:无论在室温还是高温环境下,材料经过吸湿处理后的层间切变性能均下降,温度对材料层间切变性能的影响程度没有湿度影响明显。赵杨^[18]对湿热环境下 T300/BMP316 树脂基复合材料的模量与强度进行了试验研究,试验结果表明单一温度、单一湿度均会导致复合材料强度下降,在相同吸湿率下,温度对材料强度的影响较小,而在相同的温度下,吸湿率对材料强度的影响较大,且随着温度的升高这种影响程度越大;最后文中仅简单的对试件断口进行了宏观分析,并没有对材料失效机理展开深入挖掘。除了以上采用试验方法研

究温度对树脂基复合材料力学性能影响外,一些学者还借助计算机仿真技术对复合材料内部温度场进行了研究.孙志刚等人^[19-20]利用热传导方程,建立了热流与平均温度件的对应关系,将温度函数的系数用界面的平均温度替代,进一步求解出复合材料细观温度场,并与有限元解进行对比验证.

目前,国内外对树脂基复合材料在高温环境下的力学性能的研究还不够完善,主要体现在:①由于设备的制约,高温引伸计价格昂贵,使得高温下树脂基复合材料模量数据不足;②高温下树脂基复合材料的力学模型研究不足.针对以上两点不足,本文通过试验的方法获得材料纵向、横向及面内切变力学行为;对比分析两类已有的高温力学模型;提出并讨论这 3 种力学模型的特点,应

用试验数据对模型进行验证.

1 试 验

本文选用的试验材料为 T300/QY8911-IV 双马来酰亚胺树脂基复合材料层合板,该材料是由北京航空工程研究所采用高温树脂传递模型(RTM)工艺固化成型,材料两端采用试件本身材料进行二次固化黏结于试件两端.

试验件层数及铺层顺序分别为 $[0]_8$, $[90]_8$, $[\pm 45]_{2s}$.相应尺寸分别为 $300\text{ mm} \times 12.5\text{ mm} \times 1.61\text{ mm}$, $300\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.57\text{ mm}$ 和 $300\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.80\text{ mm}$,试验件示意图见图 1.

所有试验件均在 MTS-809 试验机上进行加载,高温引伸计及高温炉均采用 MTS 专用高温

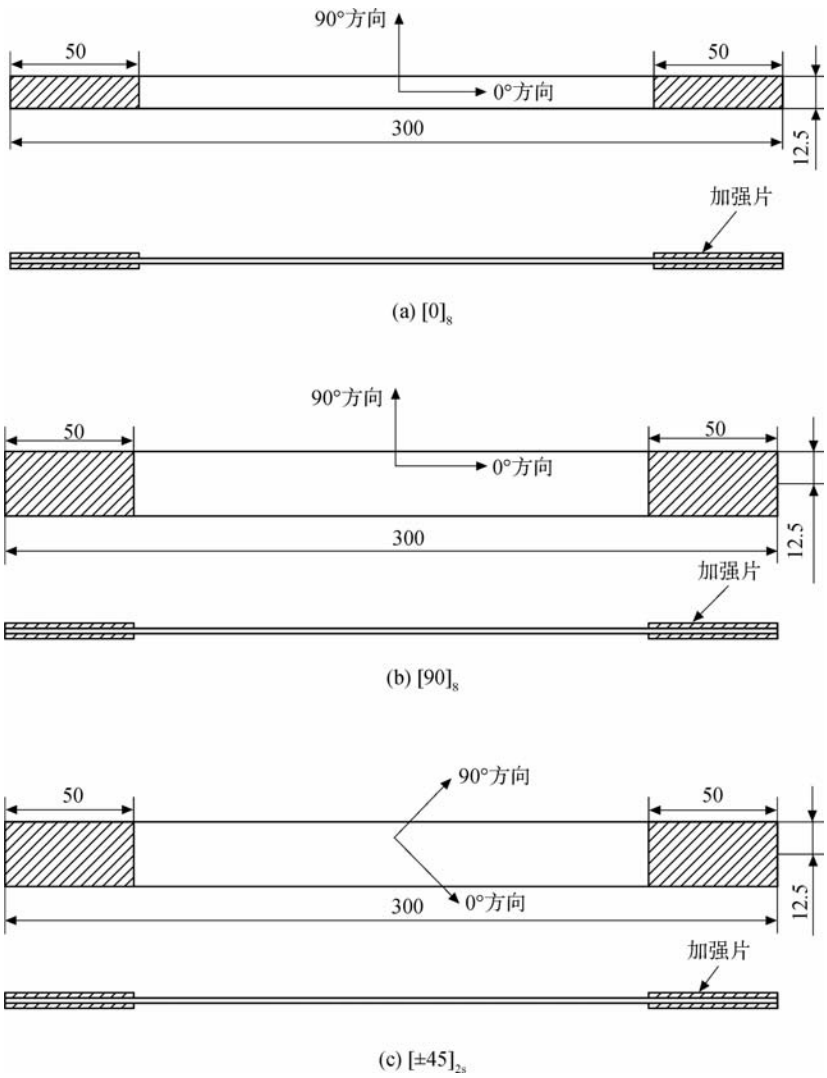
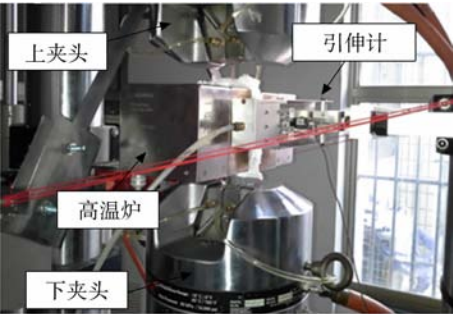


图 1 试验件尺寸示意图(单位:mm)

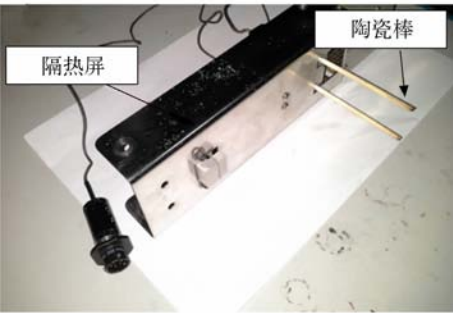
Fig. 1 Sketch of dimensions of specimen (unit:mm)

引伸计 632.53F-11 和高温炉 653,其中高温炉温度范围为 0~1400℃,温控反馈误差可控制在 2℃ 以内。

试验过程中,首先进行升温程序(采用力控制),之后保温一段时间(纵向拉伸试验保温 90 min),最后调用 MTS 静态拉伸程序,采用位移控制方式,完成考虑不同温度环境下单向层合板 3 种静态力学性能测试,静态拉伸试验参照 GB/T3354-1999 标准,相关仪器见图 2。



(a) 试验机照片



(b) 引伸计照片

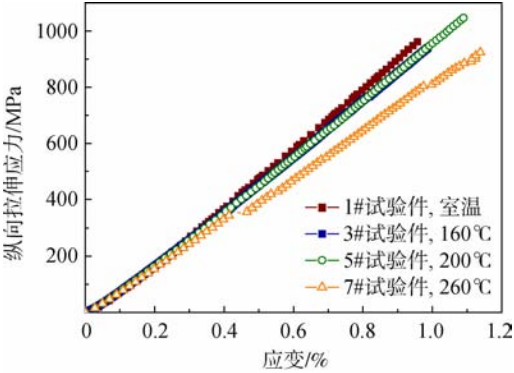
图 2 试验仪器图片

Fig. 2 Photographs of the experimental equipment

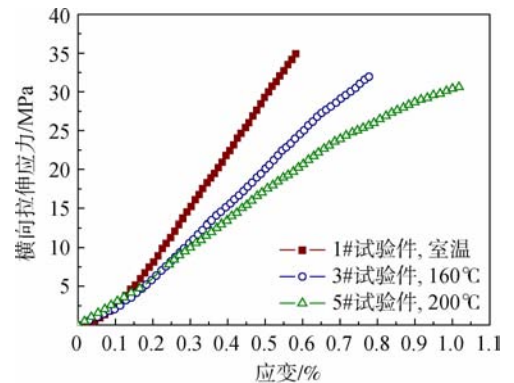
2 试验结果与数据分析

图 3 给出了不同温度、不同试验类型的典型试验件应力-应变曲线.从图 3 中可以看出,从室温到 200℃ 内,材料的纵向拉伸应力-应变曲线呈直线,而横向拉伸与面内切变试件的应力-应变曲线存在明显的非线性特征,这主要是由于纵向是纤维控制破坏,而横向及面内切变方向是树脂基体控制破坏.在此温度范围内,纤维的性能基本不受影响,但温度使得树脂的性能下降,导致树脂基体传力能力下降,因此应力-应变曲线出现明显的非线性特征.表 1 给出了不同温度、不同载荷类型下试件(原型)的模量与强度试验值.通过表 1 可以看出,随着温度升高,纵向拉伸模量、强

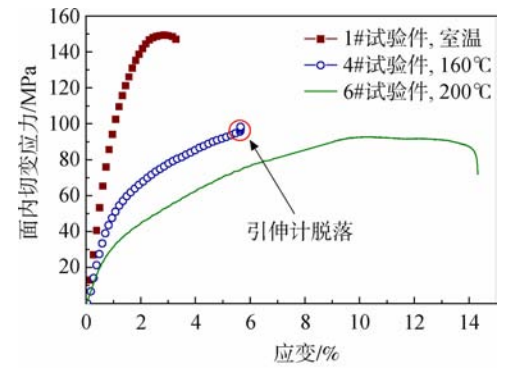
度存在微小波动,平均模量最大变幅为 2.82%,强度为 1.41%.对于横向拉伸与面内切变轴向模量均随温度的升高而显著下降.在 160℃ 时,材料的横向拉伸平均模量相对于室温下降了 49.21%,强度下降了 38.49%,面内切变模量下降了 70.34%,强度下降了 44.85%;在 200℃ 时,横向平均模量、强度继续下降了 25.13% 和 0.41%,面内切变模量与强度同样又下降了 38.30% 和 15.95%.



(a) 纵向拉伸应力



(b) 横向拉伸应力



(c) 面内切变应力

图 3 不同温度下典型试验件应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of the typical specimen at various temperatures

表 1 不同温度、不同载荷类型试验结果

Table 1 Test results at various temperatures and loads

温度	试验件	纵向拉伸 模量/GPa	纵向拉伸 强度/MPa	横向拉伸 模量/GPa	横向拉伸 强度/MPa	面内切变 模量/GPa	面内切变 强度/MPa
室温	1 #	102.12	967.78	7.19	35.68	12.17	149.44
	2 #	94.10	1 057.44	6.94	41.24	12.07	149.45
70 ℃	7 #					10.43	134.16
120 ℃	9 #	101.48	1 034.02				
	10 #					8.53	110.72
160 ℃	3 #	95.62	941.29	4.71	23.15	7.02	105.74
	4 #	95.12	1 050.20	4.76	32.39	7.21	100.61
200 ℃	5 #	95.38	1 051.19	3.59	30.71	4.40	88.72
	6 #	95.29	951.91	3.50	24.60	4.38	84.71
260 ℃	7 #	89.76	931.35				

注:表中 9 # 试验件及 10 # 试验件用于结果验证。

3 复合材料性能随温度变化理论 预测模型的建立与讨论

由表 1 可知,温度对复合材料的力学性能影响产生不同程度的影响,而对于每一个温度点进行试验显然是不现实的,因此,如何通过有限温度点数据来预测复合材料在任意温度下的力学性能将是一个亟待解决的问题。

3.1 预测数学模型 I :单参数函数模型

3.1.1 单参数模型及拟合结果

文献[1]中提出了一个单参数对数函数模型来预测不同温度下复合材料的力学性能,如公式(1)所示

$$\frac{C(t)}{C_0} = 1 - k \ln\left(\frac{t_m - t}{t_m - t_0}\right) \quad (1)$$

式中 $C(t)$ 为某温度 t 下的模量、强度; C_0 为室温下材料性能; t, t_0, t_m 分别为工况温度、室温(本文按 20 ℃ 计算)、玻璃转化温度(本文材料的玻璃转化温度为 252 ℃); k 为拟合参数。

通过公式(1)的形式可以看出,只有一个拟合参数 k 。针对不同温度、不同载荷工况试验数据进行拟合,拟合方法分别为 Levenberg-Marquardt + 通用全局优化法的组合法(下文简称 LM 法)和遗传算法(下文简称 GA 法),结果如表 3 及图 6(蓝色实线)所示。

3.1.2 模型及拟合结果分析

单参数模型采用对数形式,当拟合参数 k 大

于 0 时,随着温度升高,材料性能单调上升;当 k 小于 0 时,材料性能单调下降;当 k 等于 0 时材料材料性能不变,同时由于模型仅有 1 个参数,如果数据变化不大或数据比较接近,得到的预测结果基本上呈直线,如图 4 纵向拉伸结果图,黑色线受到 20 ℃ 和 160 ℃ 点的影响,曲线基本为直线,使得 200 ℃ 拟合结果存在一定的误差。另外,因公式采用对数的形式,在数学上本身就存在限制,即温度不能超过材料玻璃转化温度,从表 1 可知,当纵向拉伸试验温度在 260 ℃ 时,本文材料的纵向拉伸性能的保持率仍然很高,因此模型存在本质性不足。综上,此公式不能用来描述材料性能存在非单调变化的问题,也无法对温度超过材料玻璃转化温度后的性能进行描述。

3.2 预测模型 II :双参数函数模型

3.2.1 双参数幂函数模型及拟合结果

双参数幂函数模型^[2]采用幂函数的形式,如公式(2)所示

$$\frac{C(t)}{C_0} = \left(\frac{t_r - t}{t_r - t_0}\right)^n \quad (2)$$

式中 t_r, n 为拟合参数,其他参数意义同公式(1)。

针对不同温度、不同载荷工况试验数据进行拟合,拟合方法同模型 I,结果如表 3 及图 6(红色虚线)所示。

3.2.2 模型及拟合结果分析

公式(2)采用幂函数形式,随着温度的升高, $(t_r - t)/(t_r - t_0)$ 小于 1,当 $n > 1$ 时,随着 n 的增

加,温度对性能的影响越小;当 $n=1$ 时,材料性能随温度线性变化;当 $0<n<1$ 时,随着 n 的增加,温度的变化对材料性能的影响越不敏感;当 $n=0$ 时,材料性能不随温度的变化而变化;当 $n<0$ 时,随着温度的升高,材料性能下降. 另外,相对于单参数模型 I,由于引入了 2 个拟合参数,使得在不同 n 下, t_r 也可以对函数趋势进行调节,因此,可以实现对存在波动的数据进行拟合(这一点可以从图 5 看到,采用模型 II 拟合出的曲线走势发生一定的变化,更接近于不同温度下试验数据的均值点).

虽然模型 II 基本可以满足工程要求,但由于函数采用幂函数形式,函数本身要求当指数 n 为 0 时, $t_r \neq t$,否则会出现图 4 所示的失真情况(图 4 数据取纵向室温至 200 °C).

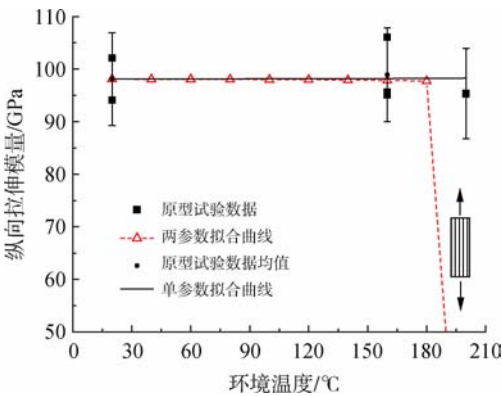


图 4 模型 II 拟合失真图 ($n=0.00178, t_r=200.001$)

Fig. 4 Distortion chart using model II
($n=0.00178, t_r=200.001$)

3.3 改进预测模型 III

考虑到模型 I 无法对超过材料玻璃转化温度的数据点进行拟合,而对于模型 II 当 $t_r \rightarrow 200$ 时,拟合曲线出现失真(图 4). 因此,本文提出如下预测模型 III:

$$\frac{C(t)}{C_0} = 1 - k \sinh\left(\frac{t - t_0}{t_r - t_0}\right) \quad t_r \in [0, 300] \tag{3}$$

式中 $\sinh(x) = (e^x - e^{-x})/2$, k 和 t_r 为拟合参数,其他参数同模型 I、模型 II.

通过公式(3)可以看出,公式(3)也为两参数模型,但与公式(2)不同的是公式(3)采用反正弦函数,克服了幂函数当次数为 0 时,底数不为 0 的限制,即 $t=t_0$,此公式依然成立. 图 5 给出了采用与图 4(拟合失真图)相同数据拟合得到的结果. 从图 5 可以看出模型 III 与模型 I 均可实现对数据的正确拟合,且模型 III(残差平方和 $E_{ss}=3.43$)的

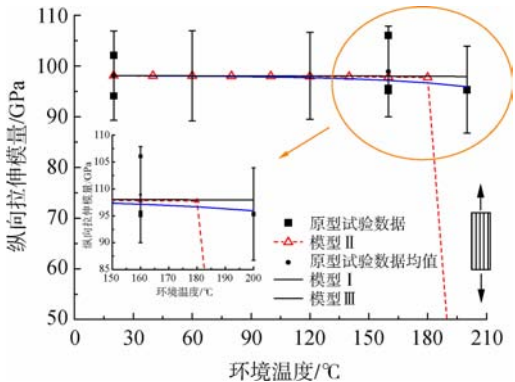


图 5 改进结果图(模型 III: $k=0.0011, t_r=67.43$)

Fig. 5 Improved chart (model III: $k=0.0011, t_r=67.43$)

拟合结果要优于模型 I ($E_{ss}=4.642$).

3.4 3 种模型拟合结果分析及验证

表 2 给出了不同温度、载荷类型下的曲线拟合结果,从中可以看出:采用 LM 法得到的拟合系数与采用 GA 法得到的拟合系数值基本一致,说明拟合方法具有全局最优性,且从拟合结果曲线来看,模型 II、模型 III 拟合结果要优于模型 I. 对于纵向拉伸模量,模型 III 的残差平方和(E_{ss})最小(约 3.081),模型 I 与模型 II 的 E_{ss} 值接近;对于纵向拉伸强度,3 种模型的拟合结果均存在一定的误差(803.046~1034.777),这主要是在不同温度下,材料均值存在一定的波动,在小范围内拟合公式的斜率不会在小范围内突然变化,因而产生了误差,但从实际测试结果来看,拟合曲线仍然很好的穿过数据点之间,且均出现在室温~200 °C 基本保持水平,而当温度超过玻璃转化温度后(260 °C)显著下降的规律;对于横向拉伸,模型 III 拟合效果最佳,且均基本穿过数据点;对于面内切变,模型 II、模型 III 同样拟合结果比较好,但从 E_{ss} 结果来看,模型 III 的结果要优于模型 II.

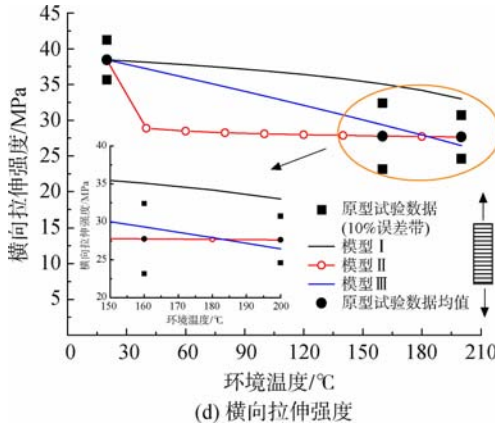
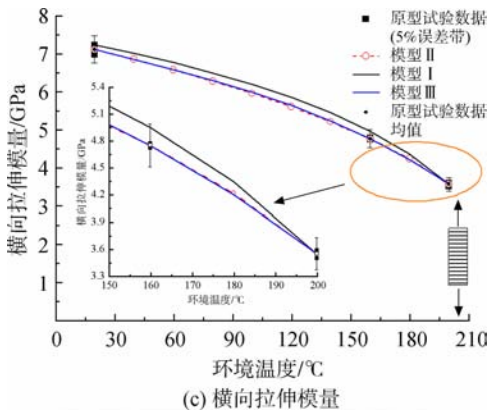
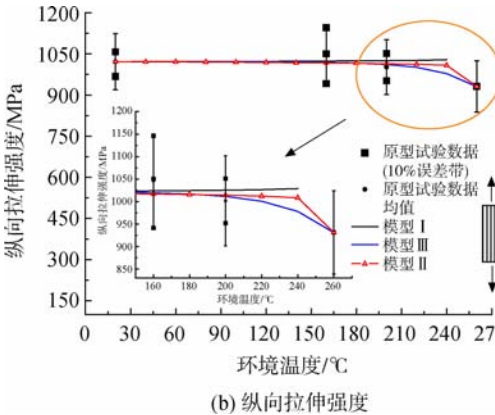
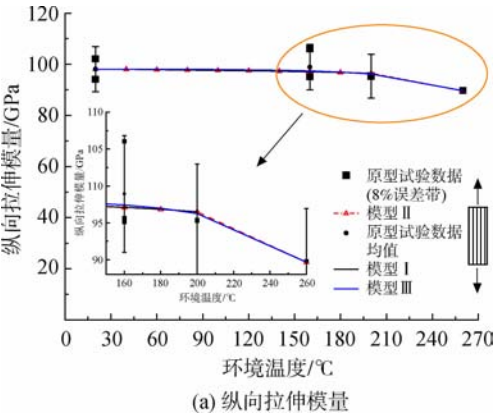
图 6 给出了采用不同模型拟合曲线结果曲线. 对于纵向模量及强度而言,采用 3 种模型拟合得到的曲线基本与试验结果重合;但对于横向模量,模型 II 及模型 III 拟合效果较好;对于横向强度,模型 III 拟合效果最好;对于面内切变性能,采用模型 II 及模型 III 拟合效果均较好.

以上对预测模型的讨论是基于残差及数学的角度,下面再通过 2 个不同温度下的试验件(9# 为纵向试验件,10# 为面内切变试验件,横向试验件由于无余量因而没有验证,均在 120 °C 温度环境下测试)对预测模型进行验证,验证结果见表 3. 从表 3 可以看出模型 I、模型 II、模型 III 均与

表 2 不同温度、不同载荷类型下 T300/QY8911-Ⅳ 曲线拟合结果

Table 2 Fitting results of T300/QY8911-Ⅳ at various temperatures and loads

参数	算法	模型Ⅰ		模型Ⅱ			模型Ⅲ		
		k	E_{ss}	n	t_r	E_{ss}	k	t_r	E_{ss}
纵向拉伸 模量	LM	-0.011	4.642	0.012	260.13	4.732	0.000408	59.707	3.081
	GA	-0.011	4.642	0.012	260.16	4.735	0.000408	59.707	3.081
纵向拉伸 强度	LM	-0.00241	968.605	0.00521	260.00000464	993.094	-2.566×10^{-5}	47.142	803.046
	GA	-0.00241	968.605	0.00704	260.000637	1034.777	-2.566×10^{-5}	47.142	803.046
横向拉伸 模量	LM	-0.339	0.0169	0.380	235.075	8.781×10^{-27}	0.194	127.706	1.662×10^{-27}
	GA	-0.339	0.0169	0.380	235.075	5.790×10^{-16}	0.194	127.706	5.649×10^{-16}
横向拉伸 强度	LM	-0.220	11.633	-0.0198	19.999	6.903×10^{-6}	0.454	299.999	4.006
	GA	-0.219	11.633	-0.0291	19.998	0.004373	0.454	299.999	4.006
面内切变 模量	LM	-0.435	0.207	0.470	223.822	0.0458	0.269	133.157	0.0656
	GA	-0.435	0.207	0.470	223.822	0.0458	0.269	133.157	0.0656
面内切变 强度	LM	-0.298	60.841	0.532	299.985	0.317	0.395	214.370	0.00345
	GA	-0.298	60.841	0.532	299.985	0.317	0.395	214.370	0.00345



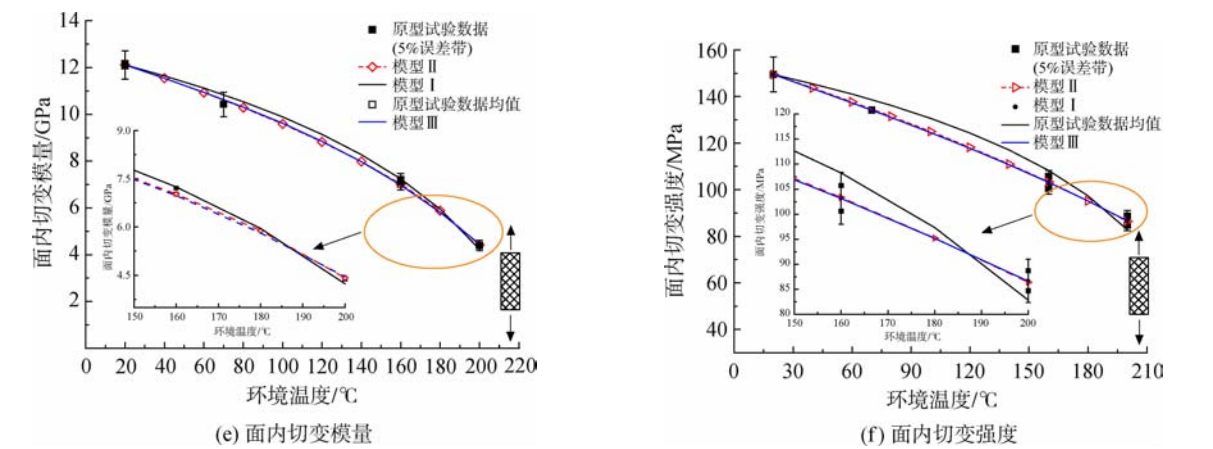


图 6 不同温度、载荷类型下模型 I、模型 II 及模型 III 拟合结果图

Fig. 6 Fitting results of model I, model II and model III at various temperatures and loads

表 3 模型验证

Table 3 Model validation

模型	9# 试验件		10# 试验件	
	纵向拉伸 模量/GPa	纵向拉伸 强度/MPa	面内切变 模量/GPa	面内切变 强度/MPa
原始	101.48	1034.02	8.53	110.72
I	97.50	1023.00	9.147	124.33
II	97.48	1018.75	8.827	118.14
III	97.86	1021.09	8.849	117.72
最优模型	III	I	III	II

注:9# 试验件和 10# 试验件性能在 120 °C 环境下测得。

原型试验值附近,另外,对于模量结果,模型 III 均最好,对于强度结果,模型 I 最好,但模型 II、模型 III 与原型试验值的误差不大,分别只有 1.48% 和 1.25%。综上,3 种模型均适用本文试验数据,但从预测精度、预测范围宽泛的角度上来看,模型 III 要优于模型 I、模型 II。

4 结 论

1) 本文通过试验测定了不同温度下 T300/QY8911-IV 纵向拉伸、横向拉伸及面内切变力学性能。通过数据曲线可以看出,纵向拉伸试件的力学性能(强度与模量)在室温~200 °C 范围内存在波动,当温度上高至 260 °C 后,纵向力学性能降低;对于横向拉伸及面内切变试验,应力-应变曲线存在明显的非线性关系,且材料性能均随温度升高而下降。

2) 对试验得到的不同温度、载荷工况下的树脂基复合材料数据采用 3 种不同的模型进行了拟合与验证,并提出了一个反正弦函数模型,该模型

可以很好的预测不同温度下复合材料纵向拉伸、横向拉伸及面内切变力学性能。从结果中可以看出,模型 I 只能预测玻璃转化温度以下的材料力学性能且预测误差要大于模型 II 和模型 III;对于模型 II,当 t_r 比较接近 t 时,预测结果会出现失真。

参考文献:

[1] Mivehchi H, Varvani-Farahani A. The effect of temperature on fatigue strength and cumulative fatigue damage of FRP composites[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 2011-2020.

[2] Ha S K, Springer G S. Nonlinear elastic properties of organic matrix composites at elevated temperatures[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1988, 110(2):124-127.

[3] Ha S K, Springer G S. Nonlinear mechanical properties of a thermoset matrix composite at elevated temperatures[J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23(11):1130-1158.

[4] Jen R M H, Tseng Y C, Kung H K, et al. Fatigue response of APC-2 composite laminates at elevated temperatures[J]. Composites Part B:Engineering, 2008, 39(7/8):1142-1146.

[5] Odegard G, Kumosa M. Elastic-plastic and failure properties of a unidirectional carbon/PMR-15 composite at room and elevated temperatures [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(16):2979-2988.

[6] Odegard G, Kumosa M. Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the Iosipescu and 10° off-axis shear tests[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(9):2917-2943.

[7] Jen R M H, Tseng Y C, Chang S C, et al. Mechanical properties in notched AS-4/PEEK APC-2 composite laminates at elevated temperature[J]. Journal of Composite Materials, 2006, 40(11):955-969.

[8] Jen R M H, Tseng Y C, Lin W H. Thermo-mechanical

fatigue of centrally notched and unnotched AS-4/PEEK APC-2 composite laminates[J]. International Journal of Fatigue,2006,28(11):901-909.

[9] Jen R M H,Sung Y C. Determination of residual strength in notched APC-2 cross-ply composite laminates at elevated temperature[J]. Journal of Composite Materials,2011,46(14):1705-1713.

[10] Rupnowski P,Gentz M,Kumosa M. Mechanical response of a unidirectional graphite fiber/polyimide composite as a function of temperature[J]. Composites Science and Technology,2006,66(7):1045-1055.

[11] Rupnowski P,Gentz M,Sutter J K, et al. Mechanical response of a woven grphite/polyimide composite to in-plane shear dominated loads at room and elevated temperatures [J]. Acta Materialia,2004,52(19):5603-5613.

[12] Kawai M S,Yajima S,Hachinone A, et al. High-temperature off-axis fatigue behaviour of unidirectional carbon-fibre-reinforced composites with different resin matrices[J]. Composites Science and Technology,2001,61(9):1285-1302.

[13] Li H,Kandare E,Li S, et al. Micromechanical finite element analyses of fire-retarded woven fabric composites at elevated temperatures using unit cells at multiple length scales[J]. Computational Materials Science,2011,55(1):23-33.

[14] Kawai M. Damage mechanics model for off-axis fatigue behavior of unidirectional carbon fiber-reinforced composites at room and high temperatures[J]. Journal of Composite Materials,1999,35(7):545-576.

[15] 李嘉禄,贺桂芳,陈光伟. 温度对三维五向编织/环氧树脂复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报,2010,27(6):58-63.

LI Jialu,HE Guifang,CHEN Guangwei. Effects of temperature on tensile property of three-dimension and five-direction braided/epoxy resin composites[J]. Aata Materiae Compositae Sinica,2010,27(6):58-63. (in Chinese)

[16] 彭雷,张建宇,鲍蕊,等. 湿热、紫外环境对 T300/QY8911 复合材料孔板静力性能的影响[J]. 复合材料学报,2009,26(3):18-23.

PENG Lei,ZHANG Jianyu,BAO Rui,et al. Effects of hydrothermal and ultraviolet conditions on static properties of T300/QY8911 laminated composites containing an open hole[J]. Aata Materiae Compositae Sinica,2009,26(3):18-23. (in Chinese)

[17] 冯青,李敏,顾铁卓,等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报,2010,27(6):16-20.

FENG Qing,LI Min,GU Yizhuo, et al. Experimental research on hydrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hydrothermal conditions [J]. Aata Materiae Compositae,2010,27(6):16-20. (in Chinese)

[18] 赵杨. 湿热条件下树脂基复合材料层合结构刚度与强度研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.

ZHAO Yang. Research on stiffness and strength of resin matrix composite laminated structures under hydrothermal environment[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2011. (in Chinese)

[19] 孙志刚,宋迎东,高德平. 纤维增强复合材料细观温度场计算[J]. 航空动力学报,2005,20(4):595-599.

SUN Zhigang,SONG Yingdong,GAO Deping. Temperature fields calculation of fiber reinforced composite at micro-level[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(4):595-599. (in Chinese)

[20] 孙志刚,宋迎东,高希光,等. 三维颗粒增强复合材料细观温度场计算[J]. 航空动力学报,2009,24(10):2285-2290.

SUN Zhigang,SONG Yingdong,GAO Xiguang, et al. Temperature fields calculation of 3-D particle reinforced composite[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(10):2285-2290. (in Chinese)

(编辑:叶 青)