复 合 材 料 学 报　　第22 卷　第5 期　10 月　2005 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 22　No. 5　October　2005

文章编号: 1000-3851(2005) 05-0178-06

玻璃纤维增强树脂基复合材料弯曲强度时间温度相关性

蔡洪能[1,*], 宫野　靖[2], 中田政之[2], 溝谷　徹[2]

(1. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049;
2. 日本金泽工业大学 先进材料科学研究开发中心, 金泽 9240838)

摘　要: 研究了玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)层合板弯曲强度高温加速试验的时间温度相关性。在不同的温度和加载速率下进行了三点弯曲试验。通过弯曲强度控制曲线的时间温度移动因子曲线分析了GFRP层合板的弯曲强度时间温度相关性。探讨了低温短时和高温长时的失效机理。通过玻璃纤维拉伸延迟断裂试验, 对GFRP层合板的低温短时弯曲强度的时间温度相关性进行了修正。修正后的弯曲强度控制曲线的时间温度移动因子曲线与基体树脂动态杨氏模量的时间温度移动因子曲线非常吻合, 表明GFRP层合板的弯曲强度取决于基体树脂的粘弹性性能。

关键词: 弯曲强度; 加速试验; 时间温度相关性; 移动因子; 延迟断裂

中图分类号: TB 330. 1　　**文献标识码**: A

TIME-TEMPERATURE DEPENDENCE OF FLEXURAL STRENGTH OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS

CAI Hongneng[1,*], MIYANO Yasushi[2], NAKADA Masayuki[2], MIZOTANI Toru[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Advanced Materials Science Research & Development Center,
Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa 924-0838, Japan)

Abstract: The time-temperature dependence of flexural strength of glass fiber reinforced plastics (GFRP, volume fraction of glass fiber: 57 %) laminates was studied by the accelerated testing method at high temperatures. The three-point bending tests were carried out at various temperatures and constant loading rates. The time-temperature dependence of GFRP laminates was investigated by means of the flexural strength master curve and time-temperature shift factor curve. The failure mechanisms at low temperature for short time to failure and at high temperature for long time to failure were investigated. With tensile delay fracture tests of the glass fiber, the time-temperature shift factors of flexural strength at various low temperatures for short time to failure were modified. The revised time-temperature shift factor curve of flexural strength of GFRP laminates agrees well with that of the dynamic Young's modulus of the resin matrix. The flexural strength of GFRP laminates depends strongly on the viscoelasticity of the resin matrix.

Keywords: flexural strength; accelerated testing method; time-temperature dependence; shift factor; delayed fracture

众所周知, 聚合物材料的力学性能不但是时间的函数, 也是温度的函数, 具有时间温度相关性, 即粘弹性。这种时间温度相关性不但表现在玻璃态转化温度 T_g 以上, 而且也表现在玻璃态转化温度 T_g 以下。因此可以假定, 以聚合物为基体的纤维增强复合材料的力学性能即使在玻璃态转化温度 T_g 以下的正常使用温度范围也具有时间温度相关性。利用时间温度相关性的时间温度等效原理, 可

收稿日期: 2004-11-17; 收修改稿日期: 2005-02-25
基金项目: 西安交通大学自然科学基金(XJJ2004011)
通讯作者: 蔡洪能, 副教授, 博士, 主要从事复合材料强度研究　E-mail: hntsai@mail.xjtu.edu.cn

以用高温来加快试验速度，快速建立起新型复合材料的服役性能数据库。

Myano 等人[1~4]和 Mc Murray 等人[5,6]对碳纤维增强聚合物基复合材料的静载强度、蠕变强度和疲劳强度进行了研究，结果表明，碳纤维增强聚合物基复合材料具有很强的时间温度相关性。碳纤维具有很高的弹性模量，碳纤维本身不具有时间温度相关性，但是以碳纤维增强的聚合物基复合材料具有与聚合物材料相同的时间温度相关性。

相对于碳纤维，玻璃纤维的弹性模量比较小，而且受拉时具有延迟断裂的特点。人们发现，由玻璃纤维增强复合材料制备的构件，在使用一段时间以后，即使施加的外加载荷很低，也有可能发生突然失效。许多研究人员从玻璃纤维增强复合材料的环境因素、失效机理、断面形貌及长期寿命等方面进行了有益的研究[7~12]。

本文中对玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板弯曲强度的时间温度相关性进行了研究。在不同温度和加载速率下进行三点弯曲试验，探讨了失效机理。通过玻璃纤维拉伸延迟断裂实验，对玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的低温短时弯曲强度的时间和温度依存关系进行了修正。

1 实 验

1.1 原材料

层合板由20 层二维编织的高性能玻璃纤维/ 环氧树脂预浸料布(每层厚度0.125 mm) 迭合而成，固化后厚度为2.1 mm。成型工艺为热压罐一次共固化成型，固化温度为130 ℃，高温保持时间为2 h，压力为0.1 MPa。层合板中玻璃纤维的体积分数为57 %。

1.2 弯曲试验

弯曲试验采用匀速率加载三点弯曲试验。试验在Instron 型的万能拉伸试验机上进行。该试验机具有工作温度范围从- 65 ℃到250 ℃的温度控制腔，最大加载能力为100 kN。加载速度由微机自动控制，位移和载荷全程监控记录。试样发生断裂时，试验机自动停止加载。试验方法及试样尺寸大小如图1 所示。三点弯曲试验在不同的加载速率和温度下进行，v = 0.02、2、200 mm/ min 和 T = 25、50、75、100、125 ℃。

2 实验结果及分析

2.1 GFRP 的位移-载荷曲线

GFRP 的位移-载荷曲线表明了载荷超过转折点后载荷上升变慢的非线性行为，如图2 所示。最

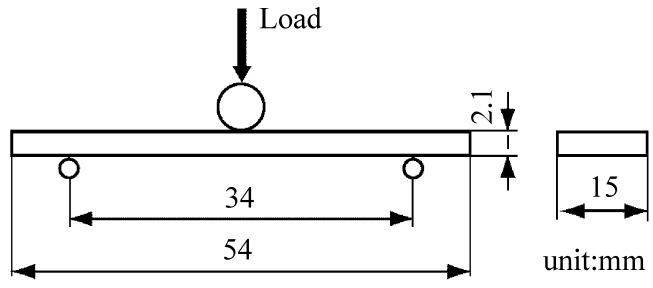

图1 玻璃纤维复合材料层合板三点弯曲试样尺寸

Fig. 1 Configuration of specimen and method of three-point bending test for the GFRP laminate

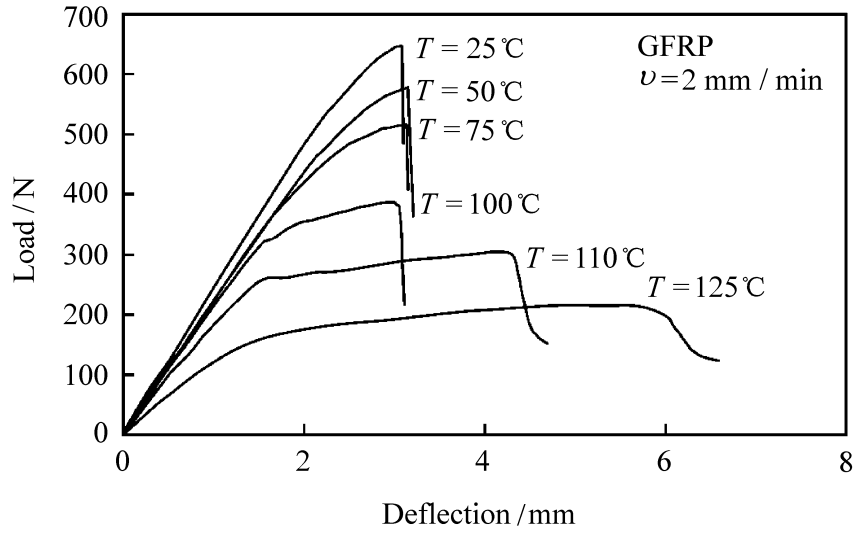

图2 玻璃纤维复合材料层合板载荷与挠度关系曲线

Fig. 2 Load-deflection curves of the GFRP laminate

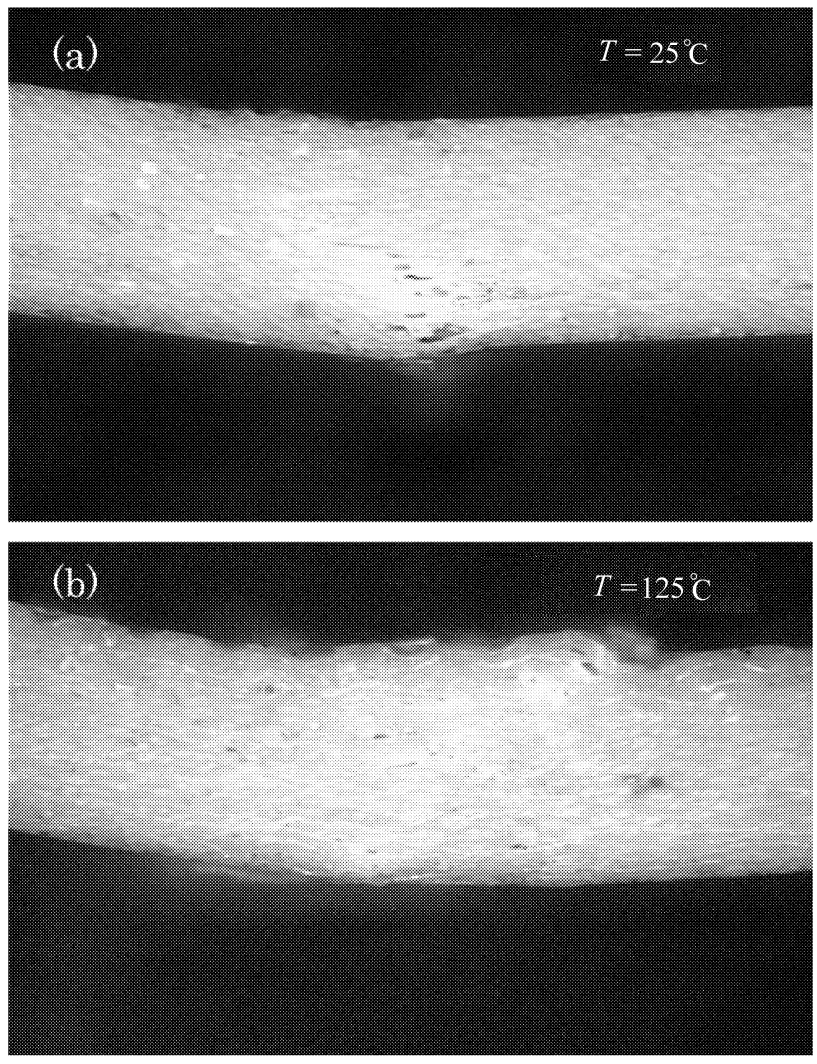

图3 玻璃纤维复合材料层合板断裂相片

Fig. 3 Fractographs of the GFRP laminate

大失效载荷随温度上升而下降。低于100 ℃，失效时的最大挠度几乎没有变化；高于100 ℃，失效时的最大挠度随温度上升而增加。在100 ℃失效机理

发生变化。低于100 ℃，试样的失效是由于下表面的拉伸断裂造成的；高于100 ℃，试样的失效是由于上表面的压缩断裂造成的，如图3 所示。

2.2　GFRP 弯曲强度的控制曲线

图4 中的左半部分为GFRP 层合板匀速(CSR)加载时弯曲强度 σ 与实际加载时间 t_s 之间的关系曲线，其中 t_s 为加载时间。右半部为CSR 弯曲强度 σ 的控制曲线，它是以参考温度 T_0 = 25 ℃试验曲线为基准，沿还原时间 t_s' 的对数坐标轴移动其它温度条件下 σ 曲线，直到它们相互重叠。实际上也可以其它温度为参考基准进行移动，得到该参考温度下的CSR 弯曲强度 σ 的控制曲线。图4 中，t_s' 是相对于参考温度 T_0 = 25 ℃的还原时间。t_s' 定义为

$$a_{T_0}(T) = \frac{t_s}{t_s'} \qquad (1)$$

式中 $a_{T_0}(T)$ 为加速试验的时间温度移动因子。从图4 中可看出，不同温度条件下的 E' 曲线可以相互重叠形成光滑的控制曲线。因此基本可以认定时间温度等效原理对GFRP 层合板的CSR 弯曲强度 σ 适用。

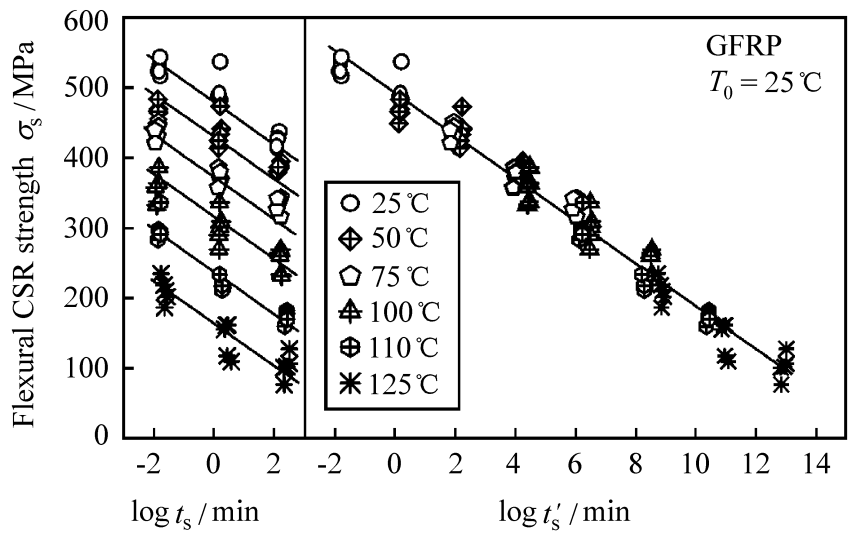

图4　玻璃纤维复合材料层合板弯曲静载强度控制曲线

Fig. 4　Master curve of flexural CSR strength for the GFRP laminate

图5 给出了层合板弯曲强度控制曲线的时间温度移动因子曲线与基体环氧树脂动态拉伸模量的时间温度移动因子曲线比较。时间温度移动因子曲线采用两个活化能 ΔH_1 和 ΔH_2 分段表示的Arrhenius 方程：

$$\log a_{T_0}(T) = \frac{\Delta H}{2.303G}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \qquad (2)$$

式中 G 为气体常数，8.314 ×10^{-3} kJ/(K·mol)。

在高于玻璃态转变温度时，时间温度移动因子吻合良好。在低于玻璃态转变温度时，时间温度移动因子曲线有所出入。根据前面的失效分析，高温时的失效是由于上表面压缩失效引发的，受压缩的上表面纤维失去了基体树脂的支撑造成的；低温时，层合板的失效发生在下表面的拉伸断裂，拉伸失效首先是玻璃纤维断裂造成的。玻璃纤维具有拉伸延迟断裂的特点，延迟断裂导致层合板弯曲强度时间温度移动因子与基体环氧树脂动态拉伸模量的时间温度移动因子有所偏差。

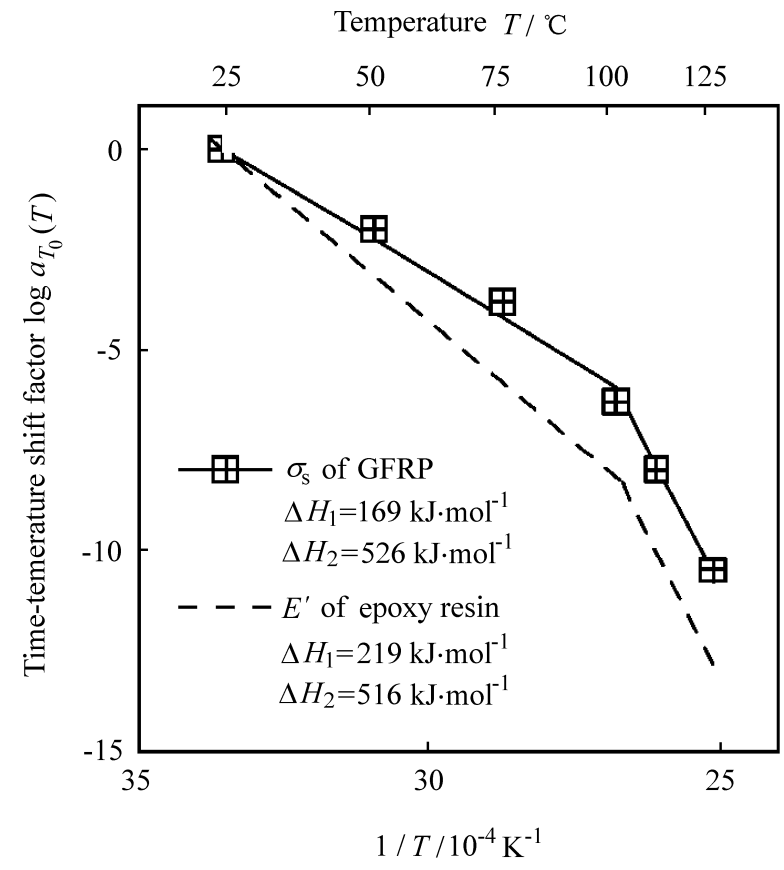

图5　玻璃纤维复合材料层合板弯曲强度和基体树脂动态拉伸模量时间温度移动因子的比较

Fig. 5　Comparison of time-temperature shift factors for storage modulus of epoxy resin and flexural strength of the GFRP laminate

3　时间温度移动因子的修正

3.1　玻璃纤维拉伸试验

由于玻璃纤维的拉伸延迟断裂特点，导致GFRP 层合板在缓慢拉伸断裂时强度下降。对玻璃纤维(GF)此处的时间相关性进行研究，把GF 的时间相关性从GFRP 的时间温度相关性中分离出来，对GFRP 时间温度相关性进行重新评价。玻璃纤维拉伸试验的试样及方法如图6 所示，试验温度为室温，加载速率为0.1、1、10、100 mm/min。

3.2　玻璃纤维拉伸试验结果

图7 所示为玻璃纤维拉伸试验不同试验速度下的无量纲拉伸强度与加载时间的关系。图中的结果是以试验速度100 mm/min 为基准进行了无量化处理。从图中可以发现，随着加载时间的延长，玻

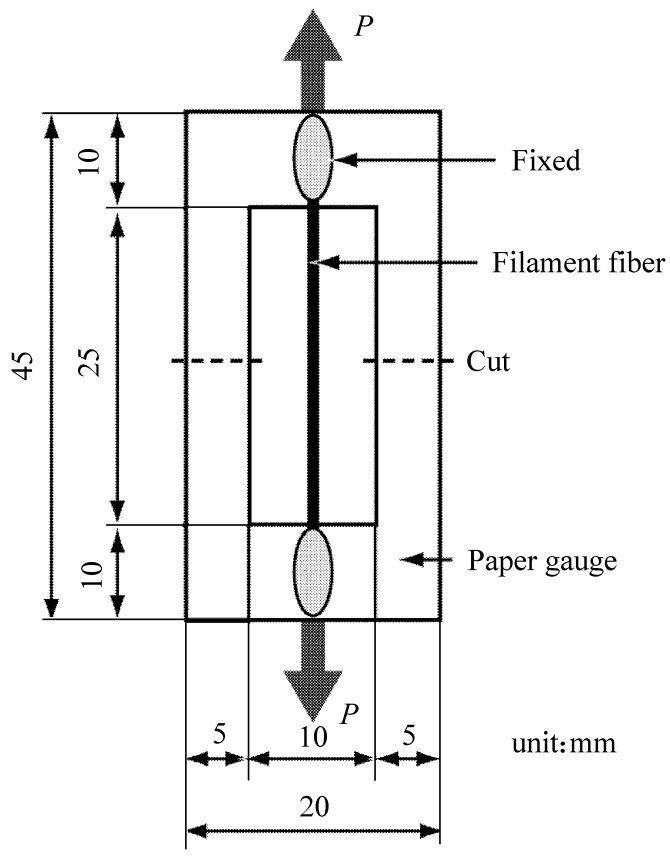

图6　玻璃纤维拉伸试验示意图

Fig. 6　Configuration of specimen and method of tension test for GF

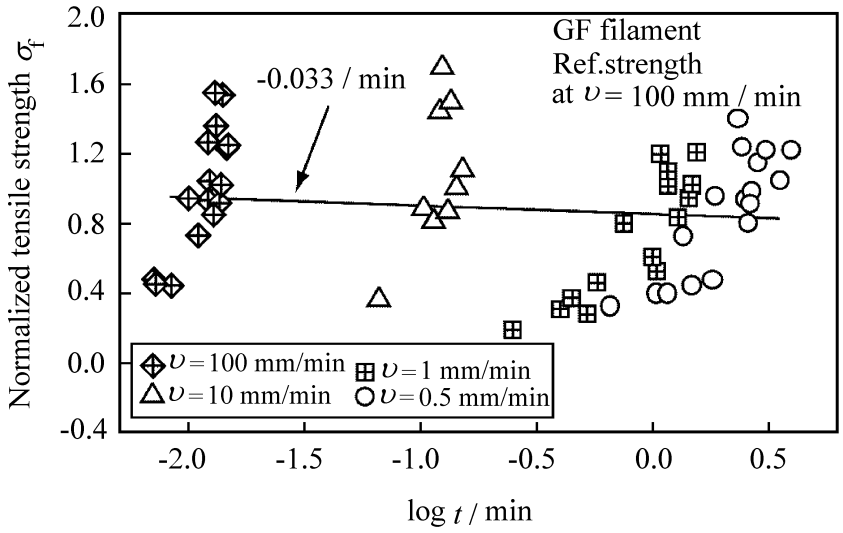

图7　玻璃纤维拉伸强度的时间依赖性

Fig. 7　Time dependence of tensile strength of GF filament

璃纤维的强度下降。玻璃纤维拉伸强度下降的幅度为时间轴对数值增加1 时，伴随k = 3 % 程度的强度下降，为拟合直线的斜率。

3.3　利用复合定律分离增强纤维的时间相关性

计入GFRP 和作为增强材料的玻璃纤维的强度时间相关性，对GFRP 的时间温度相关性进行分析。图8 给出了复合模型，利用该模型把玻璃纤维的强度时间相关性从GFRP 的时间温度相关性中分离出来。尽管GFRP 中的强化纤维是二维编织的，但是GFRP 拉伸破坏时受玻璃纤维GF 强度支配，因此只需分析试样的纵向纤维。下面是玻璃纤维GF 强度的时间相关性的分析步骤。

由于纤维的强度比基体树脂要高得多，纤维受

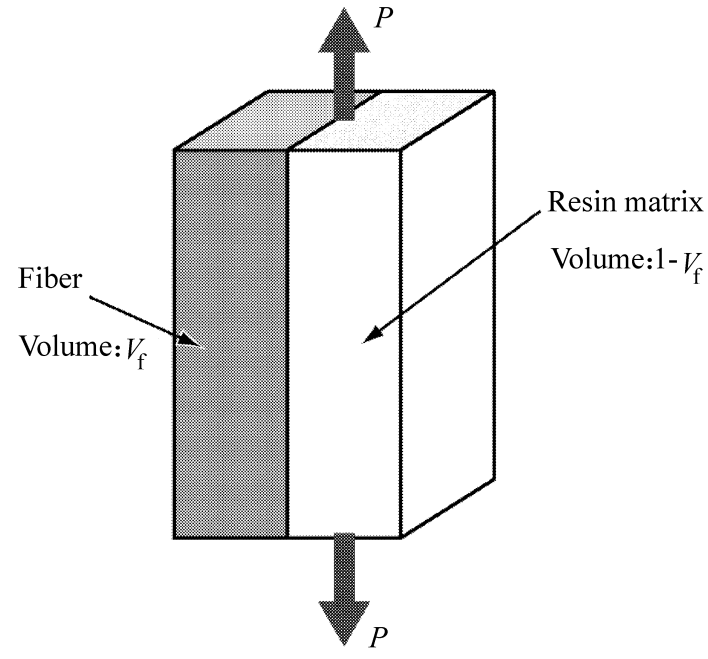

图8　玻璃纤维与基体树脂的复合模型

Fig. 8　Mixture model of GF and resin matrix

拉伸断裂后基体树脂随即断裂。根据平截面假设，基体树脂断裂时的应变与纤维的断裂应变相等，因此基体树脂的断裂应力可用纤维的断裂应力来表示

$$\sigma_m = \frac{E_m(t,T)\,\sigma(t)}{E_f} \tag{3}$$

式中：σ_m 为基体树脂的断裂应力，$\sigma(t)$ 为玻璃纤维的断裂应力，$E_m(t,T)$ 为基体树脂弹性模量，E_f 为玻璃纤维的弹性模量。GFRP 层合板中的平均应力为

$$\sigma(t,T) = V_f\,\sigma(t) + (1 - V_f)\,\sigma_m(t,T) \tag{4}$$

将式(3) 代入式(4) 有

$$\sigma(t,T) = \sigma(t)\,V_f + (1 - V_f)\,\frac{E_m(t,T)}{E_f} \tag{5}$$

由式(5) 可以得到GFRP 层合板平均应力 $\sigma(t,T)$ 与玻璃纤维的断裂应力 $\sigma(t)$ 的比为

$$\frac{\sigma(t,T)}{\sigma(t)} = V_f + (1 - V_f)\,\frac{E_m(t,T)}{E_f} \tag{6}$$

从上式可以发现，GFRP 层合板平均应力 σ 与玻璃纤维的断裂应力 $\sigma(t)$ 的比为常数。上式的推导是基于平截面假设。由于玻璃纤维的延迟断裂效应，GFRP 层合板平均的断裂应力 $\sigma(t,T)$ 下降。利用式(6) 可以把玻璃纤维的拉伸断裂的时间相关性从层合板的时间温度相关性中分离出来。GFRP 层合板平均的断裂应力 $\sigma(t,T)$ 由式(6) 和图7 对实验测得的应力值进行修正，用修正后的应力值来表示 $\sigma(t,T)$ 。当然对于压缩破坏失效的应力值不需修正。GFRP 层合板平均断裂应力 $\sigma(t,T)$ 的修正公式可以表示为

$$\sigma'(t,T) = \frac{V_f + (1 - V_f)\,\frac{E_m(t,T)}{E_f}\,\sigma(t,T)}{(1 - k\log t_s)} \tag{7}$$

3.4　GFRP 层合板修正后的弯曲强度控制曲线

图9 为修正后的 GFRP 层合板的弯曲强度控制曲线。为了方便，记修正后 GFRP 层合板平均的断裂应力 $\sigma_s(t, T)$ 为 σ_s'。从图9 可以发现，控制曲线是一条光滑的曲线，实验数据点均匀地分布在控制曲线的两侧。这说明对于 GFRP 层合板的弯曲强度，时间 温度换算准则成立，可以利用高温来等效加载时间，加速试验速度。GFRP 层合板弯曲强度的时间 温度移动因子如图10 所示。图中 GFRP 层合板弯曲强度的时间 温度移动因子曲线与基体树脂动态杨氏模量 E′的时间 温度移动因子曲线吻合很好。表明 GFRP 层合板的弯曲强度取决于基体树脂的粘弹性性能。长期加载服役后，随着基体树脂性能的降阶，GFRP 层合板的弯曲强度也发生劣化。

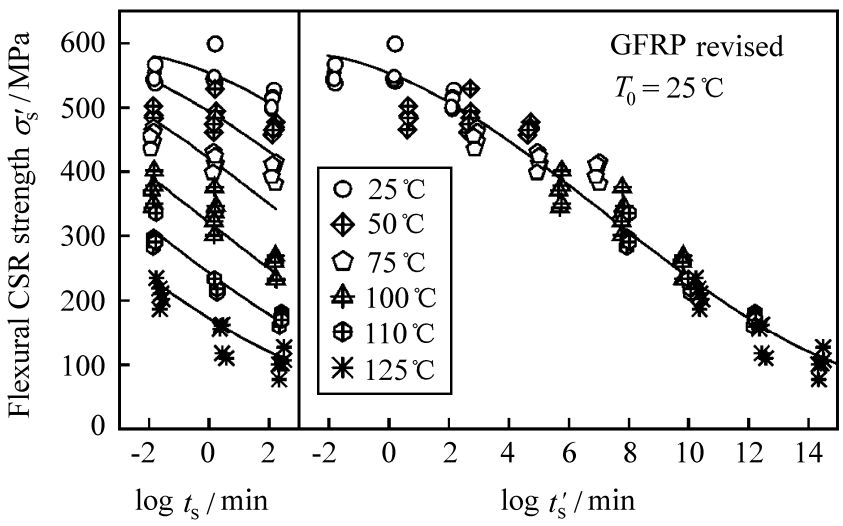

图9　修正以后的玻璃纤维复合材料层合板弯曲静载强度控制曲线

Fig. 9　Modified master curve of flexural CSR strength for the GFRP laminate

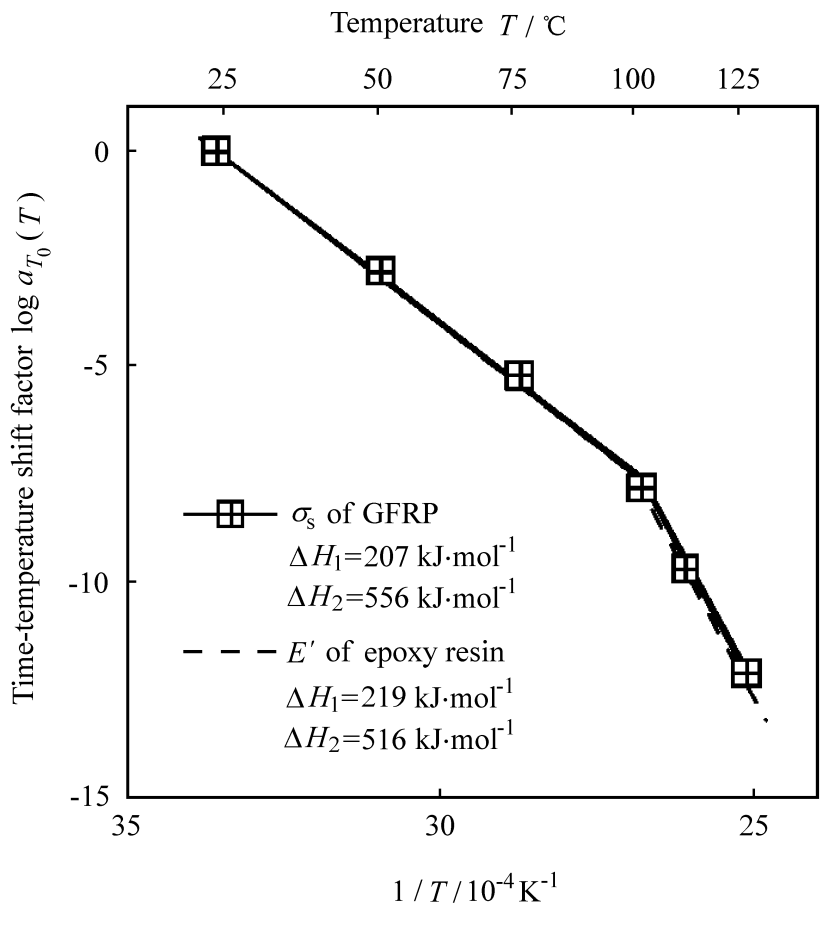

图10　时间 温度移动因子的比较

Fig. 10　Comparison of time-temperature shift factors

4　结　论

(1) 对玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的弯曲强度高温加速试验的时间温度相关性进行了研究。通过在不同温度和加载速率下的三点弯曲试验取得了弯曲强度，经过平移得到弯曲强度控制曲线。利用弯曲强度控制曲线和时间温度移动因子曲线分析了玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的弯曲强度时间温度相关性。

(2) 玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的弯曲高温长时的失效机理为基体树脂压缩失效，低温短时失效机理为玻璃纤维拉伸延迟断裂。

(3) 通过玻璃纤维拉伸延迟断裂实验，对玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的低温短时弯曲强度的时间和温度依存关系进行了修正。修正后的弯曲强度控制曲线的时间温度移动因子曲线与基体树脂动态杨氏模量的时间温度移动因子曲线非常吻合。这表明玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的弯曲强度取决于基体树脂的粘弹性性能，玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板弯曲强度的时间温度相关性成立。

参考文献:

[1] Miyano Y, kanemitsu M, Kunio T, Kunh H. Role of matrix resin on fracture strengths of unidirectional CFRP[J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20: 520-538.

[2] Miyano Y, Amagi S, Kanemitsu M. Flexural fracture behavior of carbon/aramid hybrid unidirectional reinforced FRP laminates[A]. In: Proceeding of International Symposium on FRP/CM[C]. [s.l.]: [s.n.], 1988. 1250-1260.

[3] Miyano Y, Nakada M, McMurray M K, Muki R. Prediction of flexural fatigue strength of CFRP composites under arbitrary frequency, stress ratio and temperature[J]. Journal of Composite Materials, 1997, 31(6): 619-638.

[4] Miyano Y, Nakada M, Kudoh H, Muki R. Prediction of tensile fatigue life under temperature environment for unidirectional CFRP[J]. Adv Composite Mater, 1999, 8(3): 235-246.

[5] McMurray M K, Enyama J, Nakada M, Miyano Y. Loading rate and temperature dependence on flexural fatigue behavior of a satin woven CFRP laminate[J]. Proceedings of 38th SAMPE, 1993, 38(2): 1944-1956.

[6] Enyama J, McMurray MK, Nakada M, Miyano Y. Effects of stress ratio on flexural fatigue behavior of a satin woven CFRP laminate [J]. Proceedings of 3rd Japan SAMPE, 1993, 2: 2418 - 2421.

[7] Shen Hongbin, Nutt Steven. Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam[J]. Composites Part A, 2003, 34(9): 899 - 906.

[8] Avci A, Arikan H, Akdemir A. Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer composite[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(3): 429 - 434.

[9] Ellyin Fernand, Maser Rachel. Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(12): 1863 - 1874.

[10] Gaffney K M, Botsis J. Deformation and fracture of a uniaxially reinforced composite material [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(12): 1847 - 1859.

[11] Philippidis Theodore P, Vassilopoulos Anastasios P. Life prediction methodology for GFRP laminates under spectrum loading [J]. Composites Part A, 2004, 35(6): 657 - 666.

[12] 程基伟，王天民. 取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 39 - 46.
Cheng Jiwei, Wang Tianmin. Stress corrosion cracking of oriented glass fiber reinforced plastics [J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2004, 21(6): 39 - 46.

责任编审：孙丽娟