

基于纤维束/环氧树脂复合材料试验的单向层合板 横向拉伸强度预测方法

李稳, 陈蔚, 汤立群, 蒋震宇*, 刘泽佳, 刘逸平

(华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641)

摘要: 实验研究表明, 纤维束/环氧树脂复合材料试件的横向拉伸强度与工程上常用的单向层合板横向拉伸强度在趋势上具有很好的相关性, 但是数值上存在一定差距。本文使用两种碳纤维和两种环氧树脂制备了三种纤维束/环氧树脂复合材料和单向层合板, 并分别测量了纤维束/环氧树脂复合材料和单向层合板的横向拉伸强度, 以及环氧基体的拉伸强度。在实验基础上, 应用 Griffith 断裂强度理论建立了纤维束/环氧树脂复合材料和单向层合板的横向拉伸强度的关系模型, 通过两种复合材料实验的结果拟合了该模型中的参数。利用第三种复合材料实验进行校验, 发现该模型预测的单向层合板横向拉伸强度与实测强度之间达到很好的一致性, 相对偏差为 9%。采用本文提出的方法, 可以用较为简单的纤维束/环氧树脂复合材料和环氧基体拉伸试验预测单向层合板的横向拉伸强度。

关键词: 纤维束/环氧树脂复合材料; 环氧基体; 单向层合板; 横向拉伸强度; 强度模型

中图分类号: TB330.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)02-0340-07

A prediction method of transverse tensile strength of unidirectional laminates based on test of fiber bundle/epoxy resin composites

LI Wen, CHEN Wei, TANG Liqun, JIANG Zhenyu*, LIU Zejia, LIU Yiping

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Experimental study shows that the transverse tensile strength of fiber bundle/epoxy resin composites specimens has a good correlation with the transverse tensile strength of unidirectional laminate specimens. However, there is a discrepancy in values obtained using the two testing methods. In this paper, three types of fiber bundle/epoxy resin composites and unidirectional laminates were prepared using two kinds of carbon fibers and epoxy resins. Based on the measured transverse tensile strength of fiber bundle/epoxy resin composites and unidirectional laminates, as well as the tensile strength of epoxy matrices, a strength model was established to bridge the transverse tensile strength of fiber bundle/epoxy resin composite and unidirectional laminate. The parameters in the model were fitted according to the experimental results of two types of fiber bundle/epoxy resin composites and unidirectional laminates. Then the model was verified using the third type of fiber bundle/epoxy resin composite and unidirectional laminate. It is found that the predicted transverse tensile strength of the unidirectional laminate agrees well with the measured value, with relative deviation of 9%. Therefore, the proposed method can be employed to predict the transverse tensile strength of unidirectional laminates with simple tensile tests of fiber bundle/epoxy resin composites and epoxy matrices.

Keywords: fiber bundle/epoxy resin composites; epoxy matrix; unidirectional laminates; transverse tensile strength; strength model

收稿日期: 2017-02-13; 录用日期: 2017-03-27; 网络出版时间: 2017-04-26 15:13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170426.1513.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(11202081; 11272124; 11472109)

通讯作者: 蒋震宇, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为实验力学和复合材料力学 E-mail: zhenyujiang@scut.edu.cn

引用格式: 李稳, 陈蔚, 汤立群, 等. 基于纤维束/环氧树脂复合材料试验的单向层合板横向拉伸强度预测方法[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 340-346.

LI Wen, CHEN Wei, TANG Liqun, et al. A prediction method of transverse tensile strength of unidirectional laminates based on test of fiber bundle/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 340-346 (in Chinese).

复合材料中的纤维与基体的界面显著影响着复合材料的损伤和破坏过程^[1-2]。评估纤维与基体粘接性能的实验方法大致上分为微观实验和宏观实验两类, 微观实验包括微脱粘实验(Microbond)、单纤维破碎实验(Fragmentation)、单纤维拔出/压入实验(Pull-out/push-in)等。这些实验能够获得直观的界面失效信息, 但是存在一些缺点^[3-6], 主要包括: (1)对实验观测设备和技术要求较高; (2)测试结果离散性较大; (3)几种方法的一致性较低; (4)由于单纤维本身的局限性, 难以测量界面在正应力作用下的强度; (5)有些高聚物纤维(例如聚酯纤维)本身比较柔软并且有不规则的横截面, 难以使用传统的微观实验进行测试; (6)测量得到的结果很难与工程应用的复合材料的相关指标直接对照。宏观实验则包括横向拉伸实验、短梁剪切实验、Iosipescu 剪切实验和(±45°)张拉法等。这类方法的优点在于实验参数可标准化, 其结果可以直接用于工业参考。但是进行宏观实验所需的层合板制备过程较为耗时费力, 而且对设备有一定要求^[7]。

近年来, 研究者逐渐发展了利用纤维束/环氧树脂复合材料(Fiber bundle composites, FBC)试验评估纤维增强树脂基复合材料中纤维与树脂基体的界面粘结强度^[8-9]。纤维束/环氧树脂复合材料试验可以模拟单向层合板发生破坏区域的受力情况, 同时具备制样简单方便的优点^[7]。过去的研究表明, 纤维束/环氧树脂复合材料的横向拉伸强度对纤维表面的浆料和树脂的成分比较敏感, 能够有效评估纤维与界面之间的粘结性能^[6]。Ageorges 等^[10]用纤维束/树脂横向拉伸试验研究了表面修饰过的碳纤维与环氧树脂之间的粘结性能; Ross 等^[11]通过多尺度有限元模型和实验评估了热残余应力对纤维束/树脂横向拉伸强度的影响; Jiang 等^[7, 12]使用 FBC 方法研究了分散有 SiO₂ 或富勒烯纳米颗粒的环氧树脂与碳纤维之间的粘结性能; Deng 等用纤维束/树脂的剪切实验比拟单向层合板的 Iosipescu 剪切实验, 评估纤维与基体界面的剪切性能; Zhang 等^[13]通过纤维束/树脂横向拉伸实验发现, 改变纳米颗粒含量对基体与纤维之间的粘

结性能没有显著影响; Qi 等^[14-17]建立了纤维束/树脂横向拉伸和 45°斜拉伸试验的多尺度破坏有限元模型, 评估了纤维与基体界面在正应力或切应力作用下的粘接性能, 同时研究了纤维束/树脂试件中纤维束区域内纤维体积分数对纤维束/树脂横向拉伸强度的影响。Jiang 等^[7, 12]和 Deng 等^[6]实验研究表明, 纤维束/环氧树脂复合材料的横向拉伸强度与单向层合板的横向拉伸强度存在很好的相关性, 然而二者在数值上却存在一定差异。这可能是由于两种试样中的纤维/基体界面区域尚未达到完全相同, 尤其是界面区域的边界条件略有不同, 导致实验测量的结果不能完全吻合。

本文对比了横向纤维束/环氧树脂复合材料拉伸(Transverse fiber bundle tension, TFBT)实验和单向层合板横向拉伸实验的结果, 引入 Griffith 断裂理论, 通过断裂面的表面能密度建立了这两种试件强度关系的理论模型。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

本实验所用的两种碳纤维的型号为东丽 T700 和台丽 TC35, 每束碳纤维包含 12K 根单丝, 其模量和泊松比如表 1 所示。两种纤维的平均直径均为 7 μm。双酚 A(Bisphenol A, BPA)环氧树脂的型号为 E51, 环氧当量为 196 g/mol, 由中国蓝星(集团)股份有限公司提供; 双酚 F(Bisphenol F, BPF)环氧树脂的型号为 NPEF-170, 环氧当量为 170 g/mol, 由台湾南亚科技有限公司提供; 固化剂为甲基六氢苯酚(MeHHPA), 其当量为 168 g/mol, 由濮阳惠成电子材料股份有限公司提供; 促进剂为 N,N-二甲基苄胺(BDMA), 由国药集团化学试剂有限公司提供。

1.2 实验方法

TFBT 试件的制备方法参考了文献^[18-19], 制备的 TFBT 试件如图 1(a)所示。由于哑铃形的 TFBT 试件中部较细, 从硅橡胶模具中拆下时容易造成损伤, 考虑到纤维/基体界面的粘接强度远低于树脂基体本身的强度, 本文所使用的 TFBT 试件为矩形, 尺寸为 3 cm×10 cm×80 cm。在室温下,

表 1 T700 和 TC35 碳纤维基本力学性能
Table 1 Basic mechanical properties of T700 and TC35 carbon fiber

	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa
T700	230	23	23	0.2	0.2	0.4	9	9	8
TC35	240	24	24	0.2	0.2	0.4	10	10	9

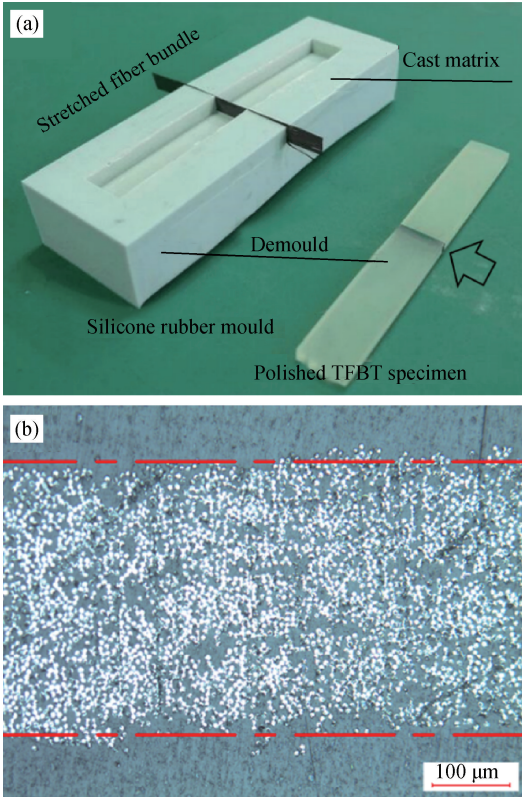


图 1 TFBT 试件的制备示意图(a)和在图(a)所示的方向下用光学显微镜观测的 TFBT 试件中的碳纤维分布情况(b)
Fig.1 Illustration of TFBT specimen preparation (a) and optical microscopic photo on fiber distribution in the TFBT specimen taken in the direction of the arrow displayed in (a) (b)

将干燥后碳纤维布上拆下的纤维束嵌入事先预留切口的硅橡胶模具中；按表 2 和表 3 所示配比将树脂、固化剂和促进剂混合搅拌均匀；再将搅拌好的树脂置于真空器皿中，抽去其中混入的微气泡；将树脂倒入模具中，再将其置于烘箱中 100℃ 保持 120 min，然后 150℃ 保持 300 min。固化后的试件需要将表面打磨至纤维束露出，进行力学实验前再在 60℃ 下干燥 480 min。本研究制备了三个复合材料体系进行研究，分别为 T700/BPA、TC35/BPA 和 TC35/BPF。

表 2 双酚 A 系列环氧树脂各成分质量配比

Table 2 Mass ratio of bisphenol A series epoxy resin

E51/g	MeHHPA/g	BDMA/g
100	86	1

表 3 双酚 F 系列环氧树脂各成分质量配比

Table 3 Mass ratio of bisphenol F series epoxy resin

NPEF-170/g	MeHHPA/g	BDMA/g
100	98.8	1.2

图 1(b)是在光学显微镜拍摄的试件侧面，其拍摄方向如 1(a)中的箭头方向，可以看出碳纤维均匀分布在环氧树脂中，纤维束的平均体积分数约为 40%。环氧树脂纯基体试件参考 ISO 527—2^[20] 的 type-5A 具体尺寸制备，制备过程如图 2 所示。

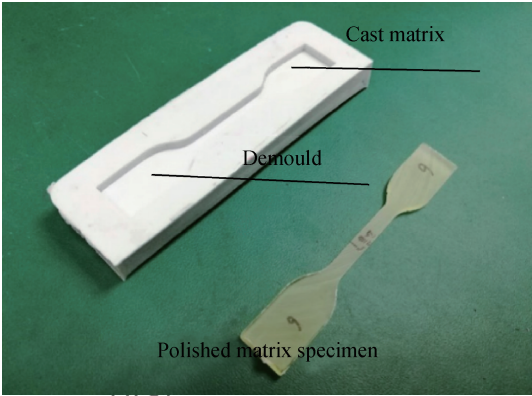


图 2 环氧树脂基体试件制备示意图
Fig.2 Illustration of epoxy matrix specimen preparation

单向层合板采用真空辅助树脂传递模塑方法 (Vacuum assisted resin transfer molding, VAR-TM) 制备，如图 3(a) 所示。图 3(b) 为该方法制备的单向层合板，从图 3(b) 中箭头方向通过光学显微镜观察，发现碳纤维也是均匀分布在环氧树脂中，纤维的平均体积分数约为 42%。如图 3(c) 所示。

环氧树脂基体试件和 TFBT 试件的测试方案参照 ISO 527—2^[20] 标准，加载速度为 1 mm/min；单向层合板横向拉伸试件的测试方案参照 ISO 527—4 标准^[21]，加载速度为 2 mm/min。三种试件都使用 Instron 5567 通用材料试验机进行拉伸实验，每组试验至少保证 8 个试件。

2 实验结果

图 4 为环氧树脂基体试件、TFBT 试件和单向层合板横向拉伸试件典型的测试曲线。BPA 试件在承受拉伸时未见明显非线性段，BPF 试件的拉伸曲线表现出一定非线性段。TFBT 试件在拉伸过程中均表现为脆断。T700/BPA 层合板试件有明显的分级断裂情况，TC35/BPA 和 TC35/BPF 层合板试件都属于脆性断裂。图 5 为 TFBT 试件的断口，断口的一侧布满碳纤维，一侧仅有极少的纤维，说明 TFBT 的破坏均发生于纤维束与环氧树脂基体的界面。复合材料试件和环氧树脂基体的强度统计结果如表 4 所示。

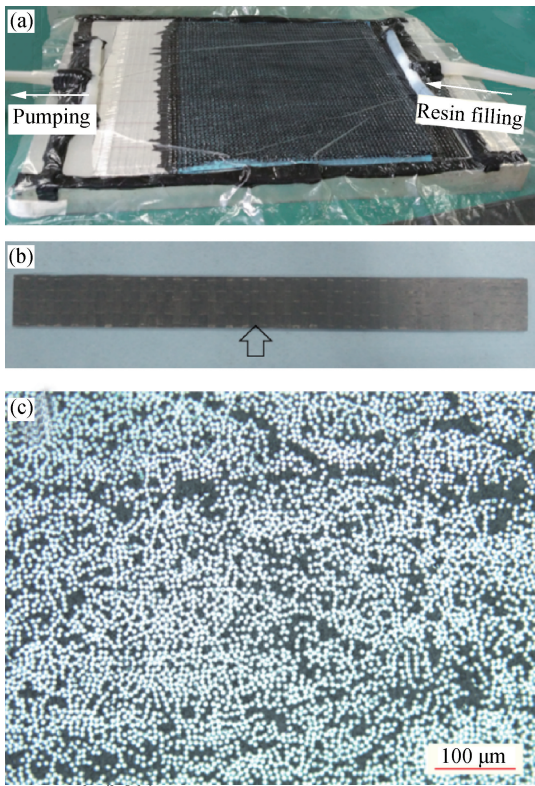


图 3 使用 VARTM 方法制备单向层合板(a)、单向层合板横向拉伸试件(b), 以及在图(b)所示的方向下用显微镜观测的层合板试件中的碳纤维分布情况(c)

Fig. 3 The VARTM setup used to prepare unidirectional laminate (a), unidirectional laminate specimen for transverse tensile test (b), optical microscopy photo on fiber distribution in the unidirectional laminate specimen taken in the direction of the arrow displayed in (b) (c)

表 4 TFBT 试件、单向层合板试件和环氧树脂基体试件拉伸测试结果

Table 4 Tensile test results of TFBT specimens, unidirectional laminates and epoxy matrix specimens

	TFBT strength/MPa	Uni-laminate strength/MPa	Epoxy matrix strength/MPa
T700/BPA	7.6±0.5	19.1±0.7	44.1±9.6
TC35/BPA	9.6±2.2	35.4±1.3	44.1±9.6
TC35/BPF	11.1±2.5	35.0±6.4	82.7±9.8

3 碳纤维/环氧树脂复合材料强度模型

由图 4 可见这三种试件的破坏均为脆性断裂, 拉伸过程中应力与应变始终保持较好的线性关系。尽管 BPF 纯基体试件的曲线有部分非线性段, 但该阶段也仅在很小范围内发生。这三种试件的断裂特征基本符合 Griffith^[22] 理想弹性体脆性断裂理论的要求。TFBT 试件和层合板横向拉伸试件同属于纤维与基体界面破坏, 但是根据表 4 的实验结果,

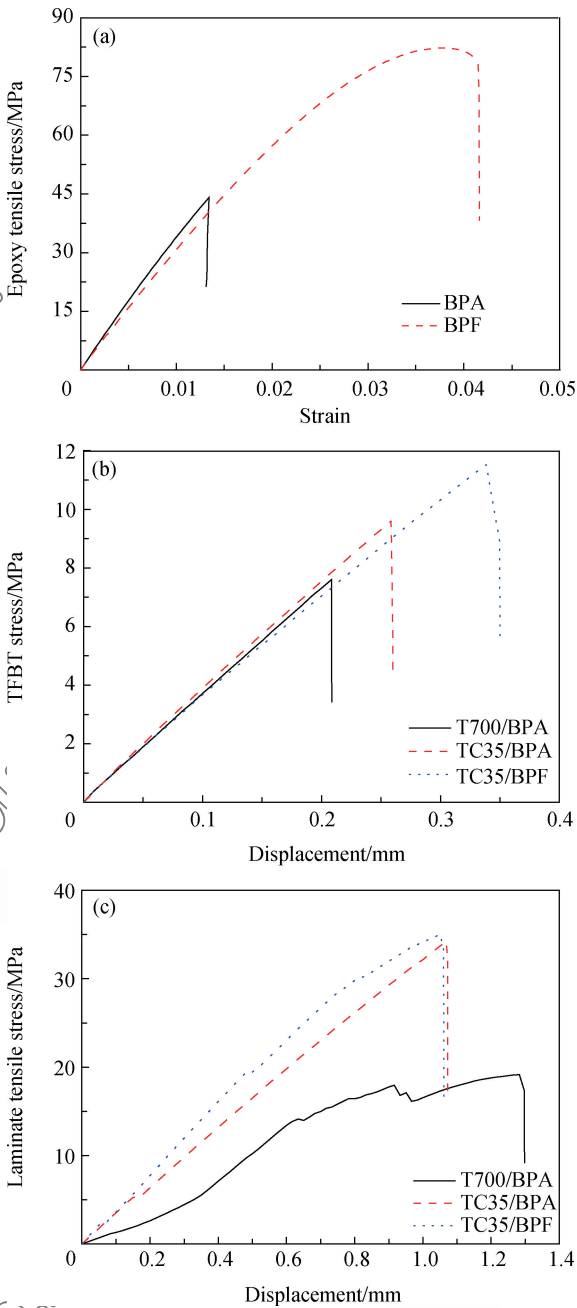


图 4 BPA 与 BPF 制备的基体试件的拉伸应力-应变曲线(a)和 T700/BPA、TC35/BPA 和 TC35/BPF 制备的 TFBT 试件(b)及单向层合板(c)的拉伸应力-位移曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curves of BPA and BPF matrix specimens (a), tensile stress-displacement curves of TFBT specimens (b) and unidirectional laminates (c) prepared by T700/BPA, TC35/BPA and TC35/BPF

层合板的横向拉伸强度明显大于 TFBT 试件的强度, 为了建立 TFBT 试件与单向层合板试件横向拉伸强度之间的强度关系, 本文引入了 Griffith 断裂理论。根据该理论, 材料的断裂强度与材料的表面能密度、弹性模量和晶格尺寸有如下关系:

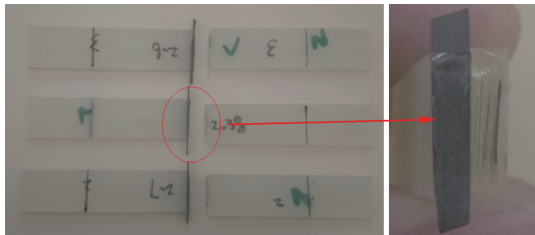


图 5 TFBT 试件的断口图像
Fig. 5 Fracture surface of TFBT specimen

$$\sigma = \sqrt{\frac{\gamma E}{b}} \quad (1)$$

其中： σ 为材料的强度； E 为材料的弹性模量； γ 为材料断口的表面能密度； b 为材料的晶格尺寸。本研究中的碳纤维束和环氧树脂基体均为非晶体材料，可考虑用材料的特征尺寸来等效 Griffith 理论中材料的晶格尺寸。

图 6(a) 为环氧树脂基体试件断裂面示意图。环氧树脂基体可视为均匀各向同性材料，根据式(1)其拉伸强度 σ_m 可表示为

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\gamma_m E_m}{b_m}} \quad (2)$$

其中： E_m 、 γ_m 和 b_m 分别为环氧树脂基体的弹性模量、断裂面的表面能密度和环氧树脂基体的材料特征尺寸。

对于单向层合板试件，可根据图 3(c) 中的碳纤维分布情况将其简化为横观各向同性材料。图 6(b) 显示了单向层合板的断裂面示意图，假设其横向弹性模量为 E_f ，其拉伸强度 σ_L 可表示为

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\gamma_f E_f}{b_f}} \quad (3)$$

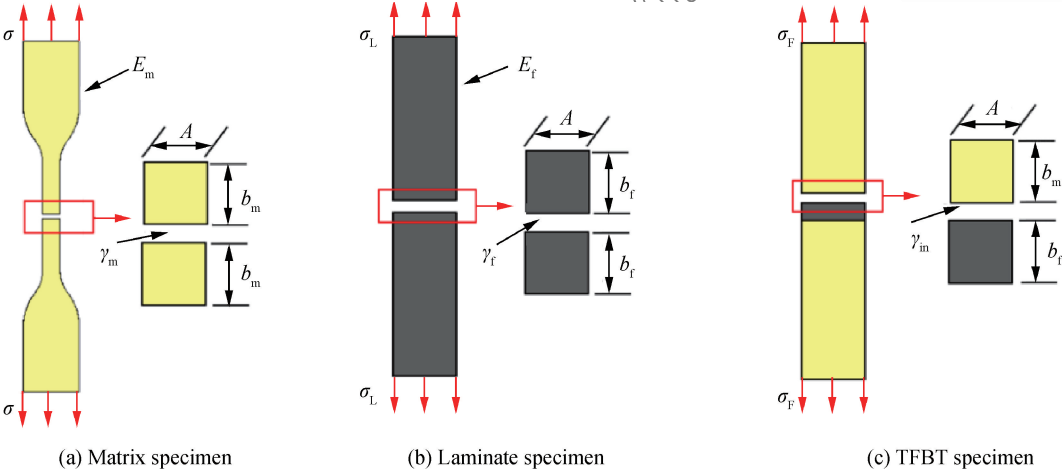


图 6 环氧树脂基体试件、单向层合板试件和 TFBT 试件的断裂面示意图

Fig. 6 Illustration of the fracture interface of epoxy matrix specimen, unidirectional laminate specimen and TFBT specimen

其中： γ_f 和 b_f 分别为层合板横向断裂面的表面能密度以及单向层合板横向拉伸破坏的材料特征长度。

对于 TFBT 试件，同样可以根据图 1(b) 中的碳纤维分布情况将 TFBT 试件的纤维束区域视为横观各向同性材料。因其碳纤维平均体积分数与层合板中的情况很接近，可以认为纤维束区域的横向弹性模量也为 E_f 。由图 5 可见，TFBT 试件的断口位于纤维束区域与基体的界面处，因而断裂面两侧可分别视为均匀各向同性的环氧树脂基体材料和横观各向同性的单向纤维增强复合材料，如图 6(c) 所示。环氧树脂基体的材料特征长度为 b_m ，纤维束一侧材料横向拉伸破坏的特征尺寸也为 b_f ，位于 TFBT 试件的断口两侧代表性单元内的应变能 U 为

$$\begin{aligned} U &= 2b_m A \bar{U}_1 + 2b_f A \bar{U}_2 \\ &= 2b_m A \frac{\sigma_F^2}{2E_m} + 2b_f A \frac{\sigma_F^2}{2E_f} \\ &= \left(\frac{b_m}{E_m} + \frac{b_f}{E_f} \right) A \sigma_F^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中： $\bar{U}_1$ 为端口处基体一侧代表性单元的应变能密度； A 为单元面积； $\bar{U}_2$ 为断口处纤维束一侧代表性单元的应变能密度； σ_F 为 TFBT 试件的强度。

TFBT 试件拉伸破坏时形成破坏面的表面能可用下式估算：

$$W = 2\gamma_m A \quad (5)$$

其中， γ_m 为断口处界面的表面能密度。

由能量守恒原理 $U = W$ ，联立式(4)和式(5)，可得 TFBT 试件的强度 σ_F ：

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{2\gamma_m}{\frac{b_m}{E_m} + \frac{b_f}{E_f}}} \quad (6)$$

进一步联立式(2)、式(3)和式(6), 便可以得到单向层合板、TFBT 试件和环氧树脂基体试件拉伸强度的关系:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\gamma_f}{\frac{2\gamma_{in}}{\sigma_F^2} - \frac{\gamma_m}{\sigma_m^2}}} \quad (7)$$

引入表面能密度比 $\lambda_1 = \gamma_f/\gamma_m$ 和 $\lambda_2 = \gamma_{in}/\gamma_m$, 式(7)可以化简为

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\frac{2\lambda_2}{\sigma_F^2} - \frac{1}{\sigma_m^2}}} \quad (8)$$

表面能密度比值 λ_1 和 λ_2 与单向层合板或纤维束/环氧树脂复合材料中的纤维体积分数和碳纤维表面处理工艺有关, 但 λ_1 和 λ_2 目前难以通过实验直接测量, 因此通过拉伸实验测量得到的强度反推这两个参数的数值。本文中三组纤维束/环氧树脂复合材料与单向层合板中的纤维体积分数几乎相等, 且使用的碳纤维表面未经特殊处理, 可近似认为三组复合材料试件中的表面能密度比值 λ_1 和 λ_2 相等。将表 4 中 BPA 环氧基体拉伸强度、T700/BPA 和 TC35/BPA 两种 TFBT 试件的强度及其相对应的单向层合板横向拉伸强度代入式(8), 可以估算得到 $\lambda_1 = 0.61$ 和 $\lambda_2 = 0.046$ 。用第三组实验数据进行检验, 计算得到的 TC35/BPF 层合板横向拉伸强度为 32 MPa, 与实验测得的 TC35/BPF 单向层合板的平均强度 35 MPa 接近, 预测结果的相对偏差为 9%。

4 结 论

(1) 实验结果表明, 横向纤维束/树脂拉伸 (TFBT) 试件和单向层合板横向拉伸试件的破坏均为纤维束与基体的界面断裂, 但是横向纤维束拉伸试件的横向拉伸强度远小于单向层合板的横向拉伸强度。

(2) 引入 Griffith 断裂强度理论建立了 TFBT 试件与单向层合板的横向拉伸强度的关系模型, 通过环氧基体拉伸强度和横向纤维束拉伸强度及其相对应的单向层合板横向拉伸强度确定上述关系模型中的未知参数。

(3) 经过实验检验, 应用本文的模型预测的单向层合板的横向拉伸强度与实测强度之间达到良好的一致性, 相对偏差为 9%。

参考文献:

[1] 曹莹, 吴林志, 张博明. 碳纤维复合材料界面性能研究[J].

复合材料学报, 2000, 17(2): 89-93.

CAO Ying, WU Linzhi, ZHANG Boming. Investigation of interfacial properties of composites reinforced by carbon fiber [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 89-93 (in Chinese).

[2] 贺金梅, 黄玉东, 周浩然, 等. CF/Epoxy 复合材料的界面自组装[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 28-33.

HE Jinmei, HUANG Yudong, ZHOU Haoran, et al. Self-assembly of the interphase of carbon fiber/epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 28-33 (in Chinese).

[3] HERRERA-FRANCO P J, DRZAL L T. Comparison methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites[J]. Composites, 1992, 23(1): 2-27.

[4] PIGGOTT M R. Why interface testing by single-fibre methods can be misleading[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(8): 965-974.

[5] PITKETECHY M J, FAVRE J P, GAUR U, et al. A round-robin programme on interfacial test methods[J]. Composites Science and Technology, 1993, 48(1-4): 205-214.

[6] DENG S, QI B, HOU M, et al. Assessment of interfacial bonding between polymer threads and epoxy resin by transverse fibre bundle (TFB) tests[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(11): 1698-1707.

[7] 蒋震宇, 张晖, 刘生, 等. 二氧化硅纳米颗粒对碳纤维与环氧树脂基体粘合强度的增强[J]. 实验力学, 2007, 22(3-4): 359-366.

JIANG Zhenyu, ZHANG Hui, LIU Sheng, et al. Improved interfacial bonding of carbon fiber/epoxy matrix modified by well-dispersed nano-sio₂ particles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(3-4): 359-366 (in Chinese).

[8] OKOROAFOR E U, PRISTON A M, HILL R. Comparison of adhesion data from the single fibre composite fragmentation method to a new multi-fibre composite method[J]. Composite Interfaces, 1995, 3(4): 275-291.

[9] OKOROAFOR E U, HILL R. Determination of fibre-resin interface strength in fibre-reinforced plastics using the acoustic emission technique[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 28(9): 1816-1825.

[10] AGEORGES C, FRIEDRICH K, YE L. Experiments to relate carbon-fibre surface treatments to composite mechanical properties[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(14): 2101-2113.

[11] ROSSO P, VÁRADI K. FE macro/micro analysis of thermal residual stresses and failure behaviour under transverse tensile load of VE/CF-fibre bundle composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(16): 3241-3253.

[12] JIANG Z, ZHANG H, ZHANG Z, et al. Improved bonding between PAN-based carbon fibers and fullerene-modified ep-

- oxy matrix[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(11): 1762-1767.
- [13] ZHANG J, DENG S, WANG Y, et al. Effect of nanoparticles on interfacial properties of carbon fibre-epoxy composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 55(6): 35-44.
- [14] QI G, DU S, ZHANG B, et al. Evaluation of carbon fiber/epoxy interfacial strength in transverse fiber bundle composite; Experiment and multiscale failure modeling[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 105: 1-8.
- [15] QI G, DU S, ZHANG B, et al. A new approach to assessing carbon fiber/epoxy interfacial shear strength by tensile test of 45° fiber bundle composites; Experiment, modeling and applicability[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 129: 214-221.
- [16] QI G, ZHANG B, YU Y. Research on carbon fiber/epoxy interfacial bonding characterization of transverse fiber bundle composites fabricated by different preparation processes; Effect of fiber volume fraction[J]. *Polymer Testing*, 2016, 52: 150-156.
- [17] QI G, ZHANG B, DU S, et al. Estimation of aramid fiber/epoxy interfacial properties by fiber bundle tests and multi-scale modeling considering the fiber skin/core structure[J]. *Composite Structures*, 2017, 167: 1-10.
- [18] 汤龙程. 纳米颗粒改性环氧树脂的断裂行为及其和纤维的界面性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011: 119-120. TANG Longcheng. Study on fracture behavior of epoxy resin modified with nanoparticle and the fiber/matrix interfacial properties[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 119-120 (in Chinese).
- [19] 刘奇. 应用纤维束复合材料试验研究层合板界面性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 27-29. LIU Qi. Fiber bundle testing technology and its application in performance evaluation of FRPs[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 27-29 (in Chinese).
- [20] International Organization for Standardization. Plastics—Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics; ISO 527—2 1993 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.
- [21] International Organization for Standardization. Plastics—Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites; ISO 527—4 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [22] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1921, 221(2): 163-198.