

T700 碳纤维/环氧复合材料力学性能试验研究

张国腾, 陈蔚岗, 杨波, 孙远君

(哈尔滨玻璃钢研究院, 哈尔滨 150036)

摘要 本文对日本东丽、东邦公司生产的 T700 碳纤维的单向板力学性能进行了试验研究, 提供了两种纤维复合材料的标准试验数据; 对于两种碳纤维的单向板纵向拉伸性能的差异, 运用材料力学方法、最弱环定理进行了分析, 发现 TOHO T700 碳纤维/环氧单向板拉伸强度较差的原因可能来自于纤维本身和隐含缺陷较多造成; 同 TOHO T700 碳纤维相比较, TORAY T700 碳纤维较为适用于纵向拉伸要求较高的产品。通过标准试验方法对 TORAY 与 TOHO 两种 T700 碳纤维进行单向板压缩性能、单向板层间界面性能比较表明, 两者抗压性能, 界面性能相近。

关键词 T700 碳纤维; 力学性能; 试验

Testing Research on Mechanical Properties of T700 Carbon Fiber/Epoxy Composites

ZHANG Guoteng, CHEN Weigang, YANG Bo, SUN Yuanjun

(Harbin FRP Institute, Harbin 150036)

ABSTRACT This article discussed the difference of two kinds of T700 Polyacrylonitrile (PAN) fibers, TORAY; TOHO carbon fiber made in Japan and provide standard laboratory test data. Analyzing the phenomenon through the theory of mechanics of materials and the most weak theorem, we find that the tensile property of the TOHO T700 carbon fiber lower than the TORAY T700 carbon fiber because the fiber itself or its composite have more weakness. The TORAY T700 carbon fiber is better to form those composites which need better tensile properties. The two fibers have similar compress and interface properties.

KEYWORDS T700 carbon fiber; Mechanical properties; Test

1 引言

碳纤维是上世纪 60 年代兴起的一种新型碳材料, 具有耐高温、耐腐蚀、热膨胀系数小、尺寸稳定性好, 高比强、高比模等优点, 是一种理想的功能、结构材料。最初发展的领域是宇航工业和军用产品, 但是如今应用领域扩展极快, 具有良好的应用前景。

根据原丝种类碳纤维可以分为聚丙烯腈(PAN)基, 人造丝、沥青基等类型。其中聚丙烯腈基纤维独具的纤维结构可制得力学性能良好的碳纤维。日本从 1962 年起开始聚丙烯腈纤维的研制, 产品质量优异, 产量达到世界高性能碳纤维的 77% 左右。

日本的东丽、东邦、三菱三大集团几乎包揽了小丝束碳纤维的制造。本文对东丽(TORAY)、东邦(TOHO)两大公司生产的相同丝束的高性能 T700 碳纤维制成的单向纤维复合材料板材(简称单向板)的基本力学性能进行测试, 提供其性能对比数据。对产生差异的数据进行理论分析, 供在产品中使用此类纤维的技术人员参考选择。

2 试验部分

2.1 原材料及试样制备

原材料:

基体材料: 环氧树脂 E51——无锡树脂厂

增强材料:

TORAY、TOHO T700 12K 碳纤维——日本

2.2 试样制备

(1) 碳纤维增强树脂缠绕成型单向板, 加热固化后, 制成试验用平板。

(2) 按标准要求分别机加工成拉伸、压缩、剪切试样。

(3) 试样除湿后, 将拉伸和压缩试样粘贴加固片, 制成标准试样, 加固片均采用铝材质板材形式。

2.3 试验执行标准

树脂含量、纤维体积含量 GB/T 3855 - 2005

孔隙率 JC 287 - 81

复合材料固化度 GB/T 2576 - 2005

单向板拉伸试验 GB/T 3354 - 1999

单向板压缩试验 GB/T 3856 - 2005

单向板层间剪切试验 JC/T773 - 1982(1996)

2.4 主要试验设备

INSTRON 5582 万能材料试验机(美国)
DH3815 静态电阻应变仪(江苏)

3 试验结果与分析

3.1 单向板纵向拉伸性能

试验前,仔细检查试样外观,试样尺寸符合标准要求,纤维排列平直规整,表面无翘曲,无损伤。从试样侧面观察,无气孔。采用胶基 3mm 栅宽的电阻应变计,应变计的粘贴平整,界面无气泡。

两组试样采用的试验过程是,弹性模量的测定方法是在破坏载荷的 50% 以内,采用分级加载,应变仪自动记录应变值得到。拉伸强度是在匀速加载情况下,达到试样完全破坏得到。

TORAY T700 单向板,试样最开始发出轻微声响是在接近破坏值 10% 左右时;而 TOHO T700 单向板,试样最开始发出轻微声响是在接近破坏值 20% 左右时。但两组试样的载荷无滑落现象,直至伴随剧烈声响,试样完全破坏,载荷值迅速回落。

TORAY T700(左)、TOHO T700

因为碳纤维属于脆性材料,试样破坏形式为纤维膨胀崩裂。图 1 是单向板(0°)碳纤维增强塑料(CFRP)的爆炸式破坏试样。图 2 所示是试验用两组纤维的不同破坏形式。

对高性能复合材料,一般会从单向板力学性能指标判断其整体性能情况。单向板纵向拉伸试验主要考察纤维承受外载的能力,而树脂只起到传递力的作用。

表 1 TORAY T700、TOHO T700 单向板纵向拉伸性能

Table with 3 columns: Property, TORAY T700 单向板, TOHO T700 单向板. Rows include: 纵向拉伸强度 MPa (1830.70, 1690.76), 离散系数% (8.53, 3.28), 纵向拉伸模量 GPa (99.22, 109.37), 离散系数% (3.26, 6.57).

表 1 试验结果显示两种单向板纵向拉伸模量值接近,但纵向拉伸强度值却有较大差异,TORAY T700 单向板拉伸强度值偏高。产生这种现象可能的原因来自于以下两个方面:

(1) TORAY T700 碳纤维略优于 TOHO T700 碳纤维

用材料力学方法分析,复合材料中,对于脆性纤维增强塑性基体,根据纤维/基体界面的载荷传递和破坏模式,破坏应变通常体现出基体要高于纤维,当基体应变达到 ε_fm, 纤维的应力达到强度值 σ_fu 而破坏,主要由纤维控制强度,如图 3 所示实线部分。

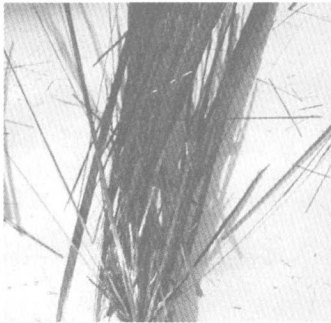


图 1 单向板(0°)碳纤维增强塑料的爆炸式破坏试样

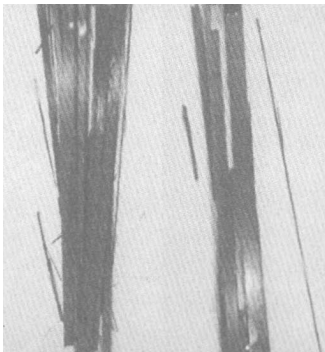


图 2 两种复合材料纵向拉伸破坏试样

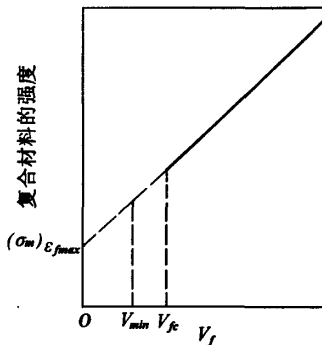


图 3 材料力学方法计算单向复合材料纵向拉伸强度

其复合材料最大应力为:

σ_c,max = σ_fu V_f + (σ_m)ε_fm (1 - V_f)

式中:ε_fm—纤维的最大应变, σ_fu—纤维破坏时的应力, σ_m—树脂破坏时的应力, V_f—纤维体积含量。

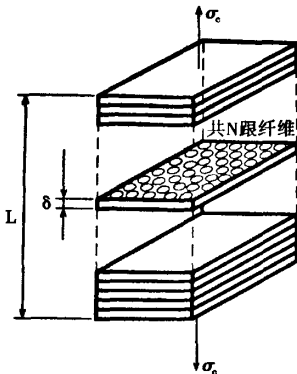
表2 TORAY T700, TOHO T700 单向板纤维体积含量

	TORAY T700 单向板	TOHO T700 单向板
树脂含量 %	37.15	35.39
纤维体积含量 %	52.21	53.02

两组单向板所采用的基体相同,纤维体积含量相近,通过上式可直接反映出增强材料的拉伸性能, TORAY T700 碳纤维略优于 TOHO T700 碳纤维。

(2) 试样隐含的缺陷对强度的影响

用复合材料最弱环定理分析法分析,单向纤维增强复合材料的纵向拉伸其破坏常常产生最弱部位,当产生裂纹时,其周围将产生局部应力扰动,而造成应力集中, Gucer - Guland - Rosen 链式模型就是利用最弱环定理来分析复合材料的破坏的。链式模型将长为 L 的复合材料分为 n 层,每一层由 N 根长为 δ 的纤维束组成。如图 4 所示。

图4 Gucer - Guland - Rosen 链式统计模型($L = n\delta$)

此模型中,基体起到传递载荷的作用,当纤维断裂时,只是含有断点的层失效,其它层的强度仍然较高。复合材料拉伸强度服从正态分布,复合材料破坏应力均值为:

$$\sigma_c^* = \bar{\sigma}_b - S_b(2\ln n)^{1/2} + S_b \frac{\ln \ln n + \ln 4\pi}{2(2\ln n)^{1/2}}$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $S_b \rightarrow 0$, $\sigma_c^* \rightarrow \bar{\sigma}_b$, 即:

$$\sigma_c^* = \sigma_0(\delta\beta e)^{-1/\beta}$$

复合材料在考虑纤维体积含量时,其拉伸强度为 $V_f\sigma_c^*$

在试验过程中已纪录 TOHO 单向板发出声响时间要比 TORAY 单向板要早,当试样发出声响时,已表明试样隐含的缺陷已暴露,无论当时是否造成对载荷的影响(载荷值无滑落现象),根据最弱环定理分析法,它都将影响最终的载荷值。这就是 TOHO 单向板的纵向拉伸应力值低于 TORAY 单向板的重要原因。

万方数据

3.2 单向板压缩性能

单向板压缩性能包括纵向压缩和横向压缩两种形式。从复合材料纵向压缩破坏形式可知,破坏形式属于复合材料形成弯折带破坏,是由于纤维受压失稳造成的。横向破坏形式是复合材料基体的剪切破坏,同时随着界面脱粘和纤维破碎。试样破坏形式见图 5、图 6。

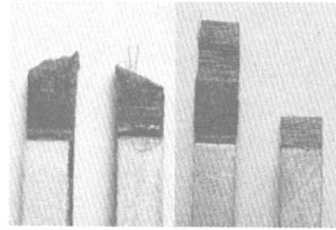


图5 单向板压缩破坏试样照片

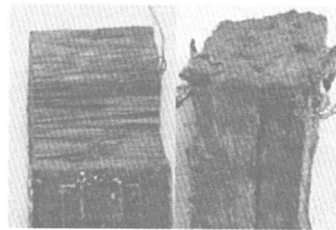


图6 单向板压缩破坏局部放大视图

在试验方法与试验条件相同的情况下,试验结果表明两种纤维具有相近的抗压能力。

表3 TORAY T700, TOHO T700 单向板压缩性能

	TORAY T700	TOHO T700
	单向板	单向板
纵向压缩强度 MPa	895.16	889.72
离散系数 %	11.89	19.52
纵向压缩模量 GPa	97.90	105.37
离散系数 %	4.02	3.08
横向压缩强度 MPa	124.54	122.65
离散系数 %	2.04	8.21
横向压缩模量 GPa	7.05	7.98
离散系数 %	4.38	3.49

3.3 单向板层间界面性能

纤维与基体的界面性能是影响复合材料性能的重要参数。若弱,增强材料无法发挥其作用,结果是复合材料的强度降低。若强,复合材料的抗损伤性能较弱,结果是断裂韧性下降。在复合材料产品设计方面更重视界面性能,通常设计要考虑界面层的强度、厚度、应力等。本文通过复合材料通用的横向

拉伸性能和层间剪切性能来考察两种纤维的界面性能。

考察复合材料基体性能的横向拉伸试验方法,及常用的测定层间剪切强度的短梁剪切试验方法,试件难免产生层间应力和应变,如自由边、厚度变化等如图7所示。当试件厚度方向的应力超过其强度值时,会引发层裂。

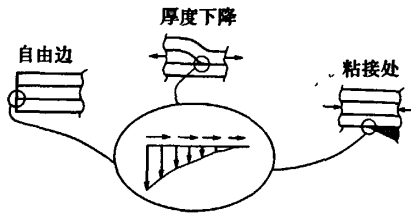


图7 来自试件应力的分层因素

表4 TORAY T700、TOHO T700 单向板界面性能

	TORAY T700	TOHO T700
	单向板	单向板
横向拉伸强度 MPa	31.31	31.31
离散系数 %	3.97	4.02
横向拉伸模量 GPa	7.40	7.82
离散系数 %	4.92	5.83
层间剪切强度 MPa	71.97	67.94
离散系数 %	3.02	2.98

试验所使用的两种碳纤维界面粘结性相差明显,这一点可从表4的试验数据得出。

4 结 语

通过以上的试验和分析结果我们不难看出如下结论:

(1)同 TOHO T700 碳纤维相比较, TORAY T700 碳纤维对于纵向拉伸要求较高的产品,是较为适用的增强材料。TOHO T700 碳纤维拉伸强度较差的原因可能来自于纤维本身和隐含缺陷较多造成。

(2)通过标准方法对 TORAY 与 TOHO 两种 T700 碳纤维进行单向板压缩性能、单向板层间界面性能比较,两者抗压性能,界面性能相近。

参 考 文 献

- [1] 陈平,李虹,王静等.等离体技术对高性能有机纤维表面改性的研究[J].纤维复合材料,2008,25(3):21-26.
- [2] 郭峰,张伟,王晓洁等.碳纤维/环氧固体火箭发动机壳体补强现状[J].纤维复合材料,2008,25(3):35-38.
- [3] 张敏,朱波,王启芬等.单向碳纤维复合材料微观形貌与性能相关性研究[J].纤维复合材料,2007,24(2):21-24.
- [4] 王建昌,安庆升,叶周军等.碳纤维复合材料卫星天线的研制[J].纤维复合材料,2007,24(1):18-20.
- [5] 白树林,戴兰宏,张庆明译.先进纤维增强复合材料性能测试[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 卢晓春,杨小平,信春玲等.碳纤维/聚苯并恶嗪复合材料的界面与力学性能的关系研究[J].玻璃钢/复合材料,2005,(3):20-23.
- [7] 张用兵,史俊虎,王利.混杂方式对 CF/UHMWPEF 混杂复合材料力学性能的影响[J].玻璃钢/复合材料,2005,(2):17-19.
- [8] 陈平,于棋,路春.纤维增强聚合物基复合材料的界面研究进展[J].纤维复合材料,2005,22(1):53-59.
- [9] 贺福.碳纤维及其应用技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [10] 赵稼祥.世界碳纤维现状与进展[J].玻璃钢/复合材料,2003,(2):40-43.
- [11] 谢斐娟,孙家骥译.工程材料的失效分析[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [12] 曾庆敦.复合材料的细观破坏机制与强度[M].北京:科学出版社出版发行,2002.
- [13] 沃丁柱主编.复合材料大全[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [14] 杜善义,王彪.复合材料细观力学[M].北京:科学出版社,1998.

(上接第48页)

参 考 文 献

- [1] 肖坤立,周晓东.热塑性复合材料的A级表面技术[J].纤维复合材料,2008,25(1):3-6.
- [2] 刘丽妍,黄故.热塑性复合材料板材拉伸强度近似计算[J].玻璃钢/复合材料,2007,(3):19-20.
- [3] 戴干策,孙斌.轻质热塑性复合片材的制备技术与应用[J].纤维复合材料,2007,24(2):3-6.
- [4] 周晓东,王秋峰,翟欢.高性能热塑性复合材料在汽车领域应用的主要问题[J].纤维复合材料,2007,24(1):3-7.
- [5] 张广平,沈春银,戴干策.玻纤毡增强聚丙烯模压成型的流动行为[J].玻璃钢/复合材料,2005,(3):38-40.
- [6] 危良才.国内外玻璃纤维制品生产现状及发展动向[J].纤维复合材料,2005,22(2):61-66.
- [7] 沈玉考.长纤维增强热塑性复合材料模塑技术新动向[J].玻璃钢/复合材料,2004,(2):53-55.
- [8] 刘学习,戴干策.玻璃纤维增强热塑性复合材料的研究进展[J].纤维复合材料,2004,21(4):55-58.
- [9] 沈玉考,张刚翼,刘扬.纤维增强热塑性复合材料新动向——从 GMT-LFT 到 All-PP[J].纤维复合材料,2004,21(2):57-59.
- [10] 戴干策.玻纤毡增强热塑性复合片及其应用[EB/OL].中国玻璃钢综合信息网(<http://www.cnfrp.net/>),2004年11月.
- [11] 顾宏梅,徐建如,冯李军.复合材料用经编织物的研制与应用[J].纤维复合材料,2003,20(3):21-23.
- [12] 蔡浩鹏,王钧,段华军.热塑性复合材料制备工艺概述[J].玻璃钢/复合材料,2003,(2):51-53.
- [13] 邓洪.纤维增强热塑性片材(GMT)的工艺技术与应用[EB/OL].江苏省复合材料网(<http://www.compositejs.com/>),2003年11月.
- [14] 张耀明.玻璃纤维与矿物棉全书[M].北京:化学工业出版社,2001.3.
- [15] 沃丁柱.复合材料大全[M].北京:化学工业出版社,2000.1.
- [16] 张碧栋.玻璃纤维工艺基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.2.

T700碳纤维/环氧复合材料力学性能试验研究

作者: [张国腾](#), [陈蔚岗](#), [杨波](#), [孙远君](#), [ZHANG Guoteng](#), [CHEN Weigang](#), [YANG Bo](#), [SUN Yuanjun](#)
作者单位: [哈尔滨玻璃钢研究院, 哈尔滨, 150036](#)
刊名: [纤维复合材料](#)
英文刊名: [FIBER COMPOSITES](#)
年, 卷(期): 2009, 26 (2)
被引用次数: 6次

参考文献(14条)

1. [陈平](#); [李虹](#); [王静](#) 等离子体技术对高性能有机纤维表面改性的研究[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2008 (03)
2. [郭峰](#); [张炜](#); [王晓洁](#) 碳纤维/环氧固体火箭发动机壳体补强现状[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2008 (03)
3. [张敏](#); [朱波](#); [王启芬](#) 单向碳纤维复合材料微观形貌与性能相关性研究[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2007 (02)
4. [王建吕](#); [安庆升](#); [叶周军](#) 碳纤维复合材料卫星天线的研制[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2007 (01)
5. [白树林](#); [戴兰宏](#); [张庆明](#) 先进纤维增强复合材料性能测试 2005
6. [卢晓春](#); [杨小平](#); [信春玲](#) 碳纤维/聚苯并(口恶)嗪复合材料的界面与力学性能的关系研究[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2005 (03)
7. [张用兵](#); [史俊虎](#); [王利](#) 混杂方式对CF/UHMWPEF 混杂复合材料力学性能的影响[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2005 (02)
8. [陈平](#); [于祺](#); [路春](#) 纤维增强聚合物基复合材料的界面研究进展[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2005 (01)
9. [贺福](#) 碳纤维及其应用技术 2004
10. [赵稼祥](#) 世界碳纤维现状与进展[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2003 (02)
11. [谢斐娟](#); [孙家骧](#) 工程材料的失效分析 2003
12. [曾庆敦](#) 复合材料的细观破坏机制与强度 2002
13. [沃丁柱](#) 复合材料大全 1999
14. [杜善义](#); [王彪](#) 复合材料细观力学 1998

本文读者也读过(2条)

1. [张国腾](#). [陈蔚岗](#). [吴东辉](#). [ZHANG Guoteng](#). [CHEN Weigang](#). [WU Donghui](#) 不同温度下T700/环氧复合材料层间剪切强度(ILSS)统计分析[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2009, 26 (4)
2. [李东风](#). [王浩静](#). [贺福](#). [王心葵](#). [LI Dong-feng](#). [WANG Hao-jing](#). [HE Fu](#). [WANG Xin-kui](#) T300和T700碳纤维的结构与性能[期刊论文]-[新型炭材料](#) 2007, 22 (1)

引证文献(6条)

1. [马小兵](#). [王亭亭](#). [赵宇](#) 融合纤维数据的复合材料筒体结构持久寿命评估方法[期刊论文]-[复合材料学报](#) 2013 (4)
2. [王智](#). [顾宜](#) 碳纤维增强苯并噁嗪树脂基复合材料的研究进展[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2011 (4)
3. [陈博](#). [万红](#). [穆景阳](#). [白书欣](#) 重频激光-载荷联合作用下碳纤维/环氧树脂复合材料失效规律[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2011 (6)
4. [张国腾](#). [陈蔚岗](#). [吴东辉](#) 不同温度下T700/环氧复合材料层间剪切强度(ILSS)统计分析[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2009 (4)
5. [张兴虎](#). [马贵斌](#). [冯海潮](#) FRP等边角材轴心受压构件的试验研究[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2011 (4)

6. 金保宏, 王柏臣, 陈平, 徐信孟 活性稀释剂对T700/BMI复合材料力学性能的影响[期刊论文]-玻璃钢/复合材料 2011(2)

引用本文格式: 张国腾, 陈蔚岗, 杨波, 孙远君, ZHANG Guoteng, CHEN Weigang, YANG Bo, SUN Yuanjun T700碳纤维/环氧复合材料力学性能试验研究[期刊论文]-纤维复合材料 2009(2)