

“竹材高效利用技术”专栏

风电叶片用竹基纤维复合材料力学性能的评价

祝荣先, 于文吉

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 采用热压法生产工艺, 利用四川地区3~4年生慈竹, 进行风电叶片用竹基纤维复合材料的生产研制, 分析竹基纤维复合材料密度与其拉伸、压缩及疲劳性能的关系。并通过与玻璃纤维增强不饱和树脂基复合材料的性能比较, 论述竹基纤维复合材料应用于风电叶片制造所具有的优异性能及经济性, 为竹叶片制造工艺设计提供初步的技术参数。

关键词: 竹基纤维复合材料; 风电叶片; 拉伸性能; 压缩性能; 疲劳性能

中图分类号: S795.5; TS653

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2012)03-0007-04

Mechanical Performance of a Bamboo-based Fiber Composite for Wind Turbines

ZHU Rong-xian, YU Wen-ji

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: A bamboo (*Sinocalamus affinis*) fiber composite with high specific strength and stiffness can be used for load-bearing wind turbine blades. The composite is made from 3~4 year-old bamboo culms that have been reconstituted and hot-pressed. Specimens, ranging in density from 1.08 to 1.20 g/cm³, were tested for tension, compression and fatigue properties and compared with traditional glass fiber composites. The results provide blade designers with positive preliminary technical parameters.

Key words: bamboo-fiber based composite; wind turbine blade; tension properties; compression properties; fatigue properties

风电叶片用竹基纤维复合材料, 是中国林科院木材工业研究所在开发的高性能竹基复合材料制造技术平台的基础上^[1-6], 利用我国3~4年生慈竹, 经过竹青竹黄差速异步点裂微创、纤维化单板制造、竹材原位可控分离、以及树脂单元梯级导入等多项关键技术, 采用热压法制备而成的一种层压结构复合材料(图1)。相比于传统的叶片制造材料——玻璃纤维增强不饱和树脂基复合材料(简称玻璃钢), 竹基纤维复合材料具有密度低、易回收再利用等显著优点^[7],

使用低能耗天然可再生材料, 代替传统高能耗不可再生人造复合材料, 发展前景良好。



图1 1.5MW 风力发电机竹叶片
(竹基纤维复合材料作为主承力结构材料)

Fig. 1 1.5MW wind turbine blade

收稿日期: 2012-02-14; 修改日期: 2012-03-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(CAFINT2011K03)。

作者简介: 祝荣先(1978—), 女, 中国林科院木材工业研究所助理研究员, 博士。

笔者对在四川洪雅竹元科技有限公司制备的 3 种密度的竹基纤维复合材料,进行了拉伸、压缩及疲劳性能的系统试验研究,并与玻璃纤维增强不饱和树脂基复合材料进行性能对比,为风电竹叶片的制造设计,提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

慈竹(*Sinocalamus affinis*):产自四川大邑,竹龄 3~4 年,胸径 50~80 mm,竹壁厚 2~3 mm;

酚醛树脂(PF):购于北京太尔,主要性能指标:黏度 41 mPa·s(25℃),固体含量 46.1%,水溶倍数 9 倍,贮存期 30 天(20~25℃),pH 值 10.53,游离醛 0.10%,游离酚<1%。

1.2 主要设备

热压机;2716 型 100 kN 电子万能实验机及引伸计(英国 INSTRON 公司);810.23 M 疲劳试验机(MTS 公司)。

1.3 制备工艺

设定板材的密度分别为 1.08、1.15、1.20 g/cm³,幅面为 1.22 m×2.44 m,厚度 27 mm。

工艺流程^[5]:竹材→剖分→疏解→干燥→浸胶→胶后干燥→组坯→热压→冷却→锯解

主要工艺参数:

1) 浸胶工艺:浸胶前纤维化单板含水率为 8%~10%,浸胶时间为 5 min,陈放 5 min,浸渍量为 9%~10%。

2) 干燥工艺:干燥温度为 70℃,浸胶后单板含水率为 8%~10%。

3) 热压工艺:温度 160℃,压力为 3.5 MPa,时间 2 min/mm。

1.4 力学性能测试

1.4.1 拉伸性能

参照 ASTM D 3500-1990 (Reapproved 2003)《Standard Test Methods for Structural Panels in Tension》,进行竹基纤维复合材料拉伸性能的测试。沿竹基纤维复合材料的纤维方向制作拉伸试件,其形状、尺寸见图 2,厚度为 25 mm。测试时拉伸速率 2 mm/min,温度 25℃。每个试验组取不少于 6 个有效试件,结果取平均值。

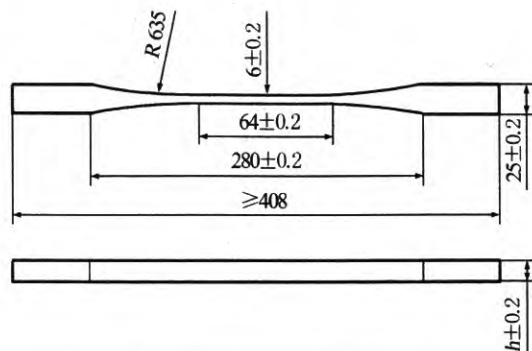


图 2 拉伸试件形状(单位:mm)和测试方法示意

Fig. 2 Dimensions and test method of tension test specimen (Units: mm)

1.4.2 压缩性能

参照 ASTM D 3501-2005a《Standard Test Methods for Wood-Based Structural Panels in Compression》进行测试。试样规格为 81×20×15 mm,压缩速率 1 mm/min,温度 25℃。每个试验组取不少于 6 个有效试件,结果取平均值。



图 3 压缩性能测试

Fig. 3 Compression test with attached extensometer

1.4.3 疲劳性能

竹基纤维复合材料用于制作风电叶片时,疲劳性能是衡量材料性能的重要指标。由于目前尚无竹基纤维复合材料的疲劳性能测试标准,故参照 GJB 2637-1996《碳纤维树脂基复合材料层合板疲劳试验方法》进行测试。

试件沿竹基纤维复合材料的纤维方向制作,其形状见图 4,试验频率设为 5 Hz。

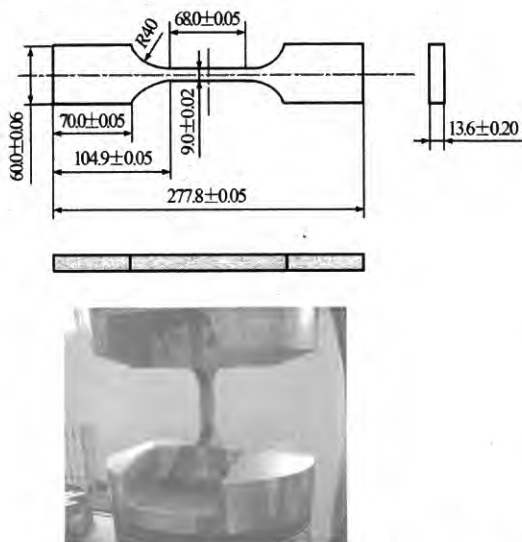


图 4 疲劳试件形状(单位:mm)和测试方法示意
Fig. 4 Dimensions and test method of fatigue test specimen (Units:mm)

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

由表 1 可知,在 1.08~1.20 g/cm³ 密度区间范围内,竹基纤维复合材料的拉伸破坏强度、拉伸模量

表 1 不同材料的拉伸强度和拉伸模量

Tab. 1 Bamboo-fiber based composite samples tensile strength and elastic properties

试验材料	密度/ (g·cm ⁻³)	拉伸破坏强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	比刚度/ (GPa·g ⁻¹ ·cm ³)
1.08(0.02)	288.00(33.32)	31.84(2.73)	29.48	
竹基纤维 复合材料	1.15(0.02)	328.17(25.03)	34.65(1.68)	30.13
	1.20(0.02)	354.78(20.17)	36.54(1.22)	30.46
玻璃纤维 (纵向)/ 聚酯 ^[8]	1.85	860~900	38	20.5
玻璃纤维 (纵向)/ 环氧 ^[8]	1.85	860~895	38	20.5
碳纤维/ 环氧 ^[8]	1.58	1 830	142	90

注:括弧内为标准偏差,下同。

以及比刚度,均随密度的增大而提高;与文献^[8]中所列的玻璃纤维、碳纤维复合材料等风电叶片材料相比,在密度较低的前提下,竹基纤维复合材料的比刚度值介于二者之间。

2.2 压缩性能

由表 2 可知,在 1.08~1.20 g/cm³ 密度区间范围内,竹基纤维复合材料的压缩破坏强度、压缩比强度、压缩模量,均随密度的增大而提高;其压缩比模量,亦介于玻璃纤维、碳纤维复合材料^[8]之间。

表 2 不同材料的压缩强度和压缩模量

Tab. 2 Bamboo-fiber based composite samples compressive strength and elastic properties

试验材料	密度/ (g·cm ⁻³)	压缩破坏强度/ MPa	压缩比强度/ (MPa·g ⁻¹ ·cm ³)	压缩模量/ GPa	压缩比模量/ (GPa·g ⁻¹ ·cm ³)
1.09(0.03)	124.23(5.20)	113.97	31.20(4.95)	28.62	
竹基纤维复合材料	1.16(0.01)	132.59(6.83)	114.30	34.17(3.81)	29.45
	1.22(0.03)	139.45(7.95)	114.30	36.32(3.29)	29.77
玻璃纤维(纵向)/聚酯 ^[8]	1.85	720	390	38	20.5
玻璃纤维(纵向)/环氧 ^[8]	1.85	720	390	38	20.5
碳纤维/环氧 ^[8]	1.58	1 100	700	142	90.0

2.3 疲劳性能

选择密度为 1.15 g/cm³ 的竹基纤维复合材料,进行应力比为 $R=-1$ (正弦波) 的拉-压疲劳性能测试,试验应力水平根据静态拉伸、压缩测试中的测试结果来确定,采用其中较小的抗压强度 132.59 MPa 作为最大应力水平,分别采用最大应力六级(0.67、0.74、0.79、0.83、0.86、0.90 倍)应力水平,即:90、98、105、110、115、120 MPa,进行疲劳性能测试。

根据疲劳测试数据,得到最大加载应力(S)与疲劳周次对数(lgN)的关系曲线,见图 5 所示。

在疲劳测试试验过程中发现,竹基纤维复合材料的破坏形式为:首先在相邻的竹纤维之间产生微小裂纹点,随后裂纹扩展到竹纤维表面;随着继续循环加载,裂纹逐步生长,直至在竹材纤维上产生;当大部分的竹材纤维发生断裂后,未发生断裂的竹材纤维所承受的应力迅速增大,随之发生试件断裂。

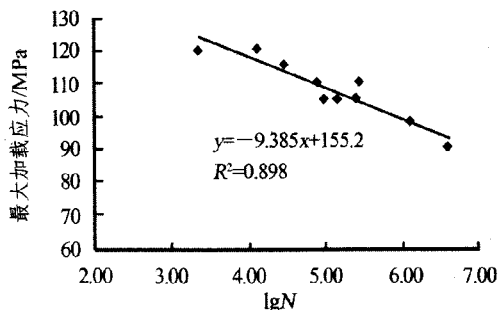


图5 竹基纤维复合材料拉压(应力比 $R=-1$)
疲劳性能曲线

Fig. 5 Fatigue curves for bamboo-fiber
based composite samples

目前在风电叶片设计中,对竹基纤维复合材料的疲劳性能没有提出具体的指标要求;然而,叶片材料由不同的复合材料构成,在设计过程中,需要对叶片所有的临界断面,叶片根部以及载荷引入区域,均进行疲劳分析。

本研究仅对竹基纤维复合材料的疲劳性能进行初步认识,需要进一步进行更深入的系统研究,为叶片设计提供科学的技术参数。

3 结论

理想的风电叶片制造材料,既需具有较高的强重

比、比刚度和疲劳强度,又需要具有低成本性,以及良好的成翼型能力。与风电叶片制造常用的玻璃纤维不饱和聚酯材料、及较昂贵的碳纤维/环氧复合材料比较,竹基纤维复合材料在拉伸、压缩、比刚度等力学性能方面,具备了制造风电叶片材料的特性,具有开发前景。今后应进一步研究竹基纤维复合材料的疲劳性能,为风电叶片的设计提供依据。

参考文献:

- [1] 于文吉. 我国高性能竹基纤维复合材料的研究进展[J]. 木材工业, 2011, 25(1): 6-8.
- [2] 孟凡丹, 余养伦, 祝荣先, 等. 浸渍量对纤维化竹单板层级材料物理力学性能的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(2): 1-3.
- [3] 祝荣先, 周月, 任丁华, 等. 制造工艺对竹基纤维复合材料性能的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(3): 1-3.
- [4] 于雪斐, 孙华林, 于文吉. 结构用慈竹单板层积材的制备工艺与性能[J]. 木材工业, 2011, 25(4): 1-3.
- [5] 张亚慧, 孟凡丹, 于文吉. 疏解次数对竹基纤维复合材料性能的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(5): 1-4.
- [6] 张亚慧, 祝荣先, 于文吉, 等. 浸胶竹纤维化单板干燥温度对竹基纤维复合材料性能的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(6): 1-4.
- [7] 玻璃钢叶片与竹叶片优势性能比较[EB/OL]. [2011-4-22]. <http://www.zhongsou.net/news/10767814.html>.
- [8] Tony Burton. 风能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(责任编辑 向琴、孟凡丹)

杭州获“中国办公家具产业基地”称号

“中国办公家具产业基地”授牌仪式, 2012年4月在浙江杭州举行, 意味着杭州办公家具行业将迎来新的发展机会。

经过数十年的发展, 杭州的家具产业已初步形成以办公家具、户外家具和软体家具制造为主, 家具原辅材料、五金和木工机械等各类产品相配套的产业体系。特别是杭州的办公家具产业, 经过20多年的长足发展, 在新产品研发设计、工艺制作及品牌建设等方面, 在国内外同行中, 均具有较高的知名度和市场占有率, 产业集群初步显现, 特色鲜明。

截止2011年底, 在杭州市工商部门登记注册的家具制造企业有1298家, 家具销售公司及家具卖场企业近2721家。2011年, 规模以上企业生产办公家具8818万件(套)以上, 销售产值240多亿元, 实现

税收10余亿, 外贸出口达14.72亿美元, 从业人员7万多人。产品由原来的单一办公桌、椅生产向办公家具系列化方向发展, 已形成了办公桌、椅、文件柜、OA屏风、办公沙发、转椅、智能办公家具、IT家具、户外椅及各类配套家具十大系列, 品种款式达2000多种。

目前, 已有320余家企业通过ISO质量管理体系认证和ISO14001环境管理体系认证, 有6家企业荣获中国驰名商标, 3家企业荣获中国名牌荣誉称号, 数十家企业分别荣获浙江省名牌、浙江省著名商标、杭州市名牌、杭州市著名商标等荣誉称号。

此荣誉称号的获得, 将为进一步推进杭州市办公家具产业有序发展, 促进结构调整, 提升产业层次和市场竞争能力, 带来充足动力。

摘自“浙江家具在线”