

## 竹丝/环氧复合材料力学性能\*

## Mechanical Property of Bamboo/Epoxy Composites

国际竹藤网络中心 孙正军 程 强 江泽慧

**[摘要]** 测试了竹丝/环氧复合材料的静载力学性能。试验结果表明,竹丝/环氧比模量高、比强度高、密度低,具有良好的应用前景。

**关键词:** 竹丝/环氧 复合材料 力学性能

**[ABSTRACT]** Static mechanical properties of bamboo/epoxy composites are tested. The test results show that bamboo/epoxy composites have the advantages of high specific modulus and high specific strength, as well as low density, so the composites have good application prospect.

**Keywords:** Bamboo/epoxy Composites Mechanical property

风轮叶片工作时处于旋转运动状态,随着时间和风向的变化,叶片的承载材料有时承受拉伸应力,有时承受压缩应力<sup>[1]</sup>。

纤维增强材料的特点是纵向拉伸强度高于压缩强度,通常,压缩强度达到要求时,拉伸强度也能满足要求。所以,在对纵向拉伸和压缩要求相同的条件下,压缩强度成为关键指标。

叶片属于长度远高于宽度和厚度的细长形产品,材料的纵向模量决定了叶片的刚度,也是评价叶片产品质量高低的关键指标之一。

单向材料的横向强度和模量、纵横剪切强度和模量、层间剪切强度、泊松比是复合材料的重要设计指标<sup>[2]</sup>,本文全面评价了竹丝/环氧复合材料的力学性能。

## 1 试验部分

### 1.1 主要原材料

分级竹丝:宽 1.2mm,厚 1.0mm;拉伸强度 350MPa,模量 22.6GPa,密度 890kg/m<sup>3</sup>。

环氧树脂:牌号 X011。

酚醛树脂:牌号 2124。

溶剂:丙酮(工业)。

### 1.2 工艺

浸胶工艺:树脂溶液浸渍 30min,沥胶,固含量 9%。

热压成型工艺:成型温度 130℃,1.5h,成型压力 3MPa。

### 1.3 性能测试参照标准

根据 GB/T17657-1999 对竹丝/环氧复合材料进行密度和含水率的检测。

采用 ASTM D3500-2003 C 型拉伸试件。压缩强度按 ASTM D 4761-2002 测定,横向拉伸强度和模量的检测参照 GB/T 3354-1999,层间剪切强度的检测参照 GB 3357-1982,纵横剪切强度和模量的检测参照 GB 3355-1982,泊松比的检测参照 GB1447-1978。

## 2 力学性能和其他物理性能的测定

力学性能测试中使用型号为 INSTRON5582 (最大载荷为 100kN)的力学试验机。

### 2.1 纵向拉伸性能

竹木基复合材料板材的厚度对材料性能有较大的影响,需要测试不同厚度板材的纵向拉伸强度和模量。测试结果见表 1。

表 1 竹丝/环氧复合材料的纵向拉伸性能

| 板厚/<br>mm | 拉伸强度/<br>MPa | 强度标准<br>差/MPa | 拉伸模量/<br>GPa | 模量标准<br>差/GPa |
|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 6.78      | 320.01       | 18.42         | 36.55        | 0.43          |
| 8.38      | 285.19       | 34.81         | 28.27        | 0.89          |
| 15.59     | 246.87       | 5.87          | 26.10        | 1.32          |
| 17.41     | 242.49       | 12.16         | 25.21        | 1.28          |
| 18.56     | 242.01       | 11.65         | 25.01        | 1.05          |
| 20.02     | 241.54       | 10.78         | 24.90        | 1.01          |

板材厚度对纵向拉伸强度和纵向拉伸模量的影响见图 1。

试验结果表明,板材薄时,材料的纵向拉伸强度可达 320MPa,模量可达 36.55GPa。当板材厚度增加时,强度和模量有明显的下降。当板材大于 17mm 时,性能变化不大。因此,选用厚度为 17.4mm 的板材进行

\* 国家“十一五”科技支撑项目 2006BAD19B05。

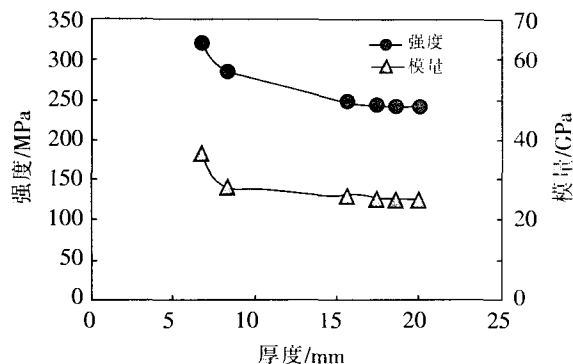


图1 不同厚度板材的纵向拉伸强度和纵向拉伸模量

Fig.1 Vertical tension strength modulus of plates with different thicknesses

下面的实验。

## 2.2 横向拉伸性能

当竹丝/环氧复合材料板材的厚度为 17.4mm 时,其横向拉伸试验结果见表 2。

表2 竹丝/环氧复合材料的横向拉伸性能

| 拉伸强度/<br>MPa | 强度标准差/<br>MPa | 拉伸模量/<br>GPa | 模量标准差/<br>GPa |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 2.17         | 0.40          | 5.97         | 0.69          |

横向拉伸强度的平均值为 2.17MPa, 强度较低;模量为 5.97GPa, 与其他复合材料性能接近。实际使用时,有必要提高横向强度。

## 2.3 纵向压缩强度

当竹丝/环氧板材的厚度为 17.4mm 时,其纵向压缩强度为 189.3MPa,标准差为 5.87MPa。对于单向竹木基复合材料来说,这是一个相当高的数值,非常有利于在风轮叶片中应用。

## 2.4 层间剪切强度

当竹丝/环氧板材的厚度为 17.4mm 时,其层间剪切强度为 21.12MPa,标准差为 2.494MPa。

在竹木基复合材料中,20MPa 以上的层间剪切强度为较高的数值,但低于玻璃纤维增强塑料(约 40~50MPa)。

## 2.5 纵横剪切强度和模量

竹丝/环氧板材的厚度为 17.4mm,其纵横剪切强度见表 3。

竹丝/环氧材料纵横剪切模量与单向玻璃纤维增强塑料相似,但剪切强度较低。

表3 竹丝/环氧复合材料的纵横剪切性能

| 强度/MPa | 强度标准差/MPa | 拉伸模量/GPa | 模量标准差/GPa |
|--------|-----------|----------|-----------|
| 2.672  | 0.101     | 2.360    | 0.047 5   |

## 2.6 弯曲强度

竹丝/环氧板材的厚度为 17.4mm,其弯曲强度为 326.5MPa,标准差为 16.50MPa。

弯曲强度高的原因在于材料表面的拉伸强度和压缩强度高。不受板材厚度的影响,接近薄板的拉伸和压缩强度。

## 2.7 泊松比

竹丝/环氧板材的厚度为 17.4mm,其泊松比为 0.297 4,标准差为 0.043 87。

## 2.8 密度和含水率的检测

测试条件:相对湿度 65%,温度 23℃。烘箱:含水率检测的干燥温度 103℃,2 次干燥后,重量差小于 0.02g。测试结果见表 4。

表4 竹丝/环氧复合材料的密度和含水率

| 检测项目                     | 平均值  | 标准差       |
|--------------------------|------|-----------|
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.08 | 0.008 667 |
| 含水率/%                    | 6.00 | 0.533     |

## 3 材料性能比较

风轮叶片的翼梁是主要承载部件,目前翼梁材料包括玻璃布/环氧、单向/三维编织玻璃钢/环氧、木层积材和竹丝/环氧复合材料。关键指标有材料的密度、拉伸模量、压缩强度和剪切强度。

材料的密度会影响叶片的重量,在同样刚度和强度要求下,重量轻的叶片,可提高叶片的发电效率。因此,评价叶片材料的重要指标是材料比强度和比模量。

材料的比模量是影响叶片刚度的重要指标,叶片刚度小,会形成较大的变形,影响到叶片的安全。单向/三维玻璃纤维增强塑料、玻纤布/环氧、木/环氧和竹丝/环氧复合材料的比模量见图 2。

结果表明,木/环氧和竹丝/环氧复合材料的比模量较高,单向/三维玻璃纤维和玻璃布/环氧增强塑料较低。而竹/环氧的比模量又高于木/环氧。因此,在同样刚度要求下,使用竹/环氧制作的叶片重量最轻,远超过 GFRP 制作的叶片。

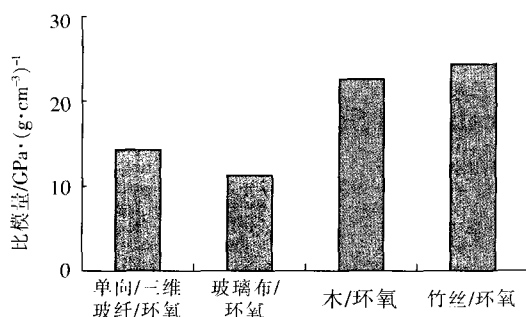


图2 叶片翼梁用材料的比模量

Fig.2 Specific modulus of materials used in wing girder of blade

风轮叶片的压缩强度至关重要,几种材料的比强度(压缩强度)见图3。

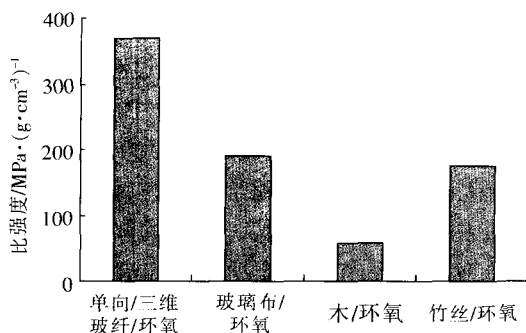


图3 叶片翼梁用材料的比强度

Fig.3 Specific strength of materials used in wing girder of blade

结果表明,单向/三维的比强度(压缩强度)较高,竹丝/环氧和玻纤布的强重比基本相当,而木/环氧的比强度较低。

使用竹丝/环氧制作的叶片的静载比强度可达到玻纤布的水平,远超过木/环氧。

#### 4 结论

(1)竹丝/环氧复合材料具有良好的拉伸比模量,超过了玻璃纤维增强塑料,用它来制造风轮叶片具有良好的刚度。

(2)竹丝/环氧材料的压缩强度好,远超过木/环氧,与玻纤布/环氧的性能相当。

(3)竹丝/环氧材料的横向和纵横剪切模量与玻璃纤维增强塑料相当,但强度较低。

(4)竹丝/环氧材料的层间剪切强度高于木/环氧,

低于玻璃纤维增强塑料,但层间剪切比强度则同它相近。

竹丝/环氧复合材料可以替代玻璃纤维增强塑料,用于制作风电叶片翼梁。

#### 参考文献

- [1] Sutherland H J. On the fatigue analysis of wind turbines [EB/OL]. 1996 [2008-1-21]. <http://www.sandia.gov/wind/Blades.htm>.
- [2] Poore R. Advanced blade manufacturing project [EB/OL]. 1999 [2008-1-21]. <http://www.sandia.gov/wind/Blades.htm>.

(黄编 金卯)

### 翔博科技与清华大学 将成立联合实验室

2008年3月11日,清华大学机械工程系教授、博导黄天佑和清华大学机械工程系副教授康进武与北京翔博科技有限责任公司领导共同签署了成立联合实验室的协议。

在中国工程院院士柳百成教授的支持下,由北京翔博科技有限责任公司技术部、研发部和清华大学机械工程系的教授、博士生导师等共同组建的联合实验室将在清华大学建立。联合实验室将以翔博公司先进的振动时效技术为依托,以清华大学的人才资源为后盾,将联合实验室打造成研发振动时效新技术的平台。联合实验室的成立将实现翔博公司和清华大学之间的强强联合,进一步完善企业现有的科技成果,同时也将促进学校的技术研发。(本刊记者 翊舟)

### 机床工具行业自主创新专题 研讨会在京召开

2008年2月23日,由科技部政策体改司和中国工业报社联合主办的“机床工具行业自主创新专题研讨会”在北京召开。科技部政策体改司、高新技术司,中国机床工具工业协会,沈阳机床、大连机床、上海机床等重要机床企业的领导参加了研讨会。

本次研讨会的主题是:如何在机床工具行业积极推进自主创新的国家战略,探索机床工具行业高档数控机床自主研发的路径,争取尽快在关键共性技术上取得实质性进展。与会各界代表纷纷发言,就发展国产高档数控机床需要的关键共性技术、制约技术突破的主要障碍、加强产学研结合、提升机床工具行业的自主创新能力等展开热烈讨论。(本刊记者 翊舟)