

# 杉木作为风电叶片复合材料增强相的性能评价

黄晓东<sup>1</sup>, 江泽慧<sup>2</sup>, 陈玲<sup>3</sup>, 任海青<sup>3</sup>

(1. 福建农林大学材料工程学院, 福建福州 350002; 2. 国际竹藤网络中心, 北京 100102;  
3. 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:** 为开发风能作为全球的新能源, 针对目前风电玻璃钢叶片存在问题, 对分级杉木作风电叶片复合材料增强相的可行性进行了研究。结果表明: 由一、二级分级杉木制成的风电叶片复合材料, 其最大拉伸强度和最大压缩强度, 均达到或超过目前国外使用的常规木材/环氧层积材风电叶片材料, 完全能够替代玻璃钢叶片材料而大量使用。

**关键词:** 风电叶片; 复合材料; 增强相; 杉木; 分级

中图分类号: S791.27; TS65 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2009)01-0024-04

## Evaluation of Strength Grading *Cunninghamia lanceolata* as Reinforcement of Wind-Turbine-Blade Composites

HUANG Xiao-dong<sup>1</sup>, JIANG Ze-hui<sup>2</sup>, CHEN Ling<sup>3</sup>, REN Hai-qing<sup>3</sup>

(1. College of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;  
2. Research Institute of International Center for Bamboo and Rattan (ICBR), Beijing 100102, China;  
3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;  
Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Because petroleum and coal, as primary energy resources, are diminishing and cause pollution and environmental problems, wind energy will provide a sustainable and green alternative to the increasing world demand for energy. Traditional fiberglass-reinforced plastic (FRP), which is primarily used to make wind blades, faces some challenges such as sustainability, cost, and disposal. In this study, the feasibility of utilizing *Cunninghamia lanceolata* to make wind turbine blades was investigated. The results showed that the maximum tensile strength of wind turbine blades, along its grain direction, was 123 MPa and its maximum compression strength was 82 MPa. Their mechanical performance was equivalent to, or exceeded, the commonly-used wood/epoxy materials. The results show that the *Cunninghamia lanceolata* could be a potential alternative for wind blades in the future, but further research about its reliability are needed.

**Key words:** wind turbine blades; composite; reinforcement; *Cunninghamia lanceolata*; grading

由于石油的短缺, 以及用矿物燃料发电所带来的环境污染问题, 使风力发电又重新受到了各国的重视<sup>[1-2]</sup>。目前用于风力发电的叶片一般采用玻璃纤维

增强塑料(简称玻璃钢)复合材料制造。这种材料虽然制造工艺成熟, 但成本较高(10万~20万元/t); 而且, 玻璃钢的废旧产品既难以燃烧, 又不易分解, 国外多采用堆积方式处理, 占用了大量土地<sup>[3]</sup>。因此, 必须开发出一种新的低成本、可回收利用的环保叶片, 以替代目前大量使用的玻璃钢叶片<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2008-05-04; 修改日期: 2008-12-05

基金项目: 福建省教育厅科技项目(JA08065)。

作者简介: 黄晓东(1966—), 男, 福建农林大学讲师, 博士。

风电叶片复合材料是一种多相材料,增强相物理力学性能的高低,直接影响材料的性能。因此,要生产具有优良物理力学性能的复合材料,加入的增强相必须具有较高的力学性能。

杉木是我国南方广泛生长的主要木材品种之一,其来源广泛,蓄材量大,生长相对较快,密度低,纹理直,结构均匀,防腐性能良好<sup>[5]</sup>。为了探索利用杉木作为风电叶片增强相的可行性,笔者通过重组的方式制造了杉木风电叶片复合材料。在制备风电叶片复合材料的过程中,为了使加入的杉木增强相具有较高的力学性能,首先对杉木按力学性能的大小进行了分级,做到优材优用<sup>[6]</sup>。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料

杉木(*Cunninghamia lanceolata*) 采自湖南绥宁,选取树龄>40 年、直径>30 cm,树干通直,外观无腐朽、弯曲等缺陷的新伐材。

胶黏剂 1) LK-DN60 双组分集成材拼接胶,其主剂为聚醋酸乙烯酯乳液,固化剂为异氰酸酯,北京世纪丽凯胶粘剂科技有限公司产。

技术参数:白色或淡黄色乳液,pH 值 6~8,固体含量约 46%,黏度为 150 mPa·s。使用时以  $m$ (合成乳胶): $m$ (固化剂)=100:15 调配均匀。

2) 低分子量液体双酚 A 型环氧树脂,2 种,牌号分别为 618 和 SK-3,均为岳阳石油化工总厂产。

技术参数:淡黄透明液体,环氧当量为 210~230 g/Eq,软化点 12~20℃,无机氯含量 $\leq 5 \times 10^{-5}$ ,易皂化氯含量 $\leq 0.10\%$ 。

3) 酚醛(PF)树脂,北京太尔化工有限公司产。

技术参数:密度 1.199 g/cm<sup>3</sup>,固体含量 43.34%,黏度 89 mPa·s,pH 值 12.8。

### 1.2 仪器

木材万能试验机,冷压机,木工锯机,电子天平(0.001 g),烘箱等。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 杉木风电叶片复合材料的制作工艺流程

杉木锯解→木条分级→涂胶组坯→冷压成型→木方刨切→单板浸胶→组坯热压→分级杉木单板层积材→检验合格→杉木风电叶片复合材料。

其主要工序的操作如下。

1) 杉木锯解:通过“米”字型下料,剔除心材,锯取杉木边材径切毛坯板,在干燥窑里烘干至含水率<

12%,剔除各种木材缺陷,精加工制成 500 mm×20 mm×20 mm(长×宽×厚)的木条备用。

2) 木条分级:按杉木木条的弯曲弹性模量指标来划分。参照 ISO 3349-1975《木材 静力弯曲弹性模量》,采用弦向加荷,测定杉木木条的弯曲弹性模量( $E$ )。在试样长度中央,以径向尺寸为宽、弦向为高,精确至 0.1 mm;两点加荷,用百分表测量试样变形;下、上限载荷取 300~700 N,试验机以均匀速度先加荷至下限载荷,记录指示值,再均匀加荷至上限载荷,记录指示值,随即卸载。如此反复 4 次。

根据杉木木条  $E$  值大小,将其分成 3 级:

1 级  $E > 12\,000$  MPa;

2 级  $12\,000 \text{ MPa} \geq E \geq 10\,000$  MPa;

3 级  $E < 10\,000$  MPa。

3) 涂胶组坯:采用 LK-DN60 双组分集成材拼接胶,将 3 种等级的杉木木条,分别以顺纹方式进行涂胶组坯,涂胶量为 200 g/m<sup>2</sup>(单面),陈化时间为 20 min,组坯时注意错开接缝。

4) 冷压成型:将不同等级杉木条组成的木方送入冷压机冷压成型。冷压工艺参数为:压力 1 MPa,时间 90 min。

5) 木方刨切:将冷压成型后的木方放置 24 h 后,沿径向刨切成 1 mm 厚的杉木单板备用。

6) 单板浸胶:调制浸渍环氧混合树脂,质量配比为:618 环氧树脂 30%,SK-3 环氧树脂 30%,PF 树脂 40%。将加工好的分级杉木单板浸渍 30 min,树脂浸渍量约为 30%;陈化 1~2 h 后放入烘箱低温干燥,备用。

7) 组坯热压:将浸渍了环氧混合树脂的分级杉木单板分别组坯。每块板坯 46 层,初始厚度为 46 mm,压缩率约 55%。

热压工艺参数为:温度 120℃,压力 15 MPa,时间 100 min。热压机垫板涂硅油脱模,以防粘板。

#### 1.3.2 杉木风机叶片复合材料的性能检测

将压制的规格为 500 mm×220 mm×25 mm(长×宽×厚)的分级杉木单板层积材取出,放置 24 h 后,精加工成 500 mm×200 mm×20 mm(长×宽×厚)的试板。

拉伸强度检测用试件的加工,参照 ASTM(美国试验材料学会) Designation: D 3500-90<sup>[7]</sup>。按平均分布的原则,每片层积材加工 3 个拉伸试样,试样的加工尺寸见图 1;5 个试件为一组,共进行 3 组试验,取平均值。

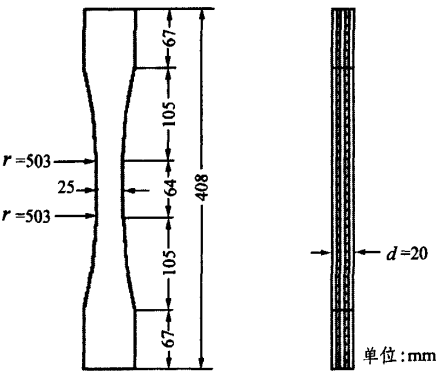


图1 ASTM 3500 C型拉伸试样尺寸  
Fig.1 Dimension of specimens for testing  
their tensile strengths

其他试件的加工及检测方法, 详见 ASTM Designation: D 3500-90<sup>[7]</sup>。

2 试验结果与分析

将分级杉木单板层积材风电叶片复合材料, 分别与常规风电叶片材料和常规无接头木材/环氧层积材进行比较, 结果见表 1~2。

2.1 分级杉木风电叶片复合材料与常规风电叶片材料的比较

从表 1 可知, 木材/环氧层积材复合材料的强度比其他材料低。因此, 木材/环氧层积材叶片不适合制成弦向细长型, 这是因为在高速运行的叶片尖处, 叶片转动方向的弯矩较大, 为了保证叶片高速运行的稳定性, 必须增加木材/环氧复合材料的厚度<sup>[7-8]</sup>。对此, 有研究指出, 对于失速调节机组, 如果蒙皮厚度同弦长之比恒定, 则叶片应变对转速非常敏感, 并按四次方增加<sup>[9]</sup>。对弦向细长型叶片而言, 尽管增加蒙皮厚度可以降低材料的应变值, 但由于其蒙皮厚度同弦长之比为恒定值, 不能随意增加蒙皮厚度<sup>[6]</sup>。

表 1 分级杉木复合材料与常规风电叶片材料的比较  
Tab. 1 Comparison between *Cunninghamia lanceolata* composite materials and  
the advanced composite materials used for wind turbine blades

| 材料         | 纤维体积分数<br>及铺设方向     | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最大拉伸<br>强度/MPa | 最大压缩<br>强度/MPa | 压缩比强度/<br>(MPa·g <sup>-1</sup> ·cm <sup>3</sup> ) | 杨氏模量/<br>GPa | 比刚度/<br>(GPa·g <sup>-1</sup> ·cm <sup>3</sup> ) | 壁板稳定性<br>参数/MPa |
|------------|---------------------|------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| 玻璃/聚酯层压板   | 50%, 纵向铺设           | 1.85                         | 860~900        | 720            | 390                                               | 38           | 20.5                                            | 0.07            |
| 玻璃/环氧层压板   | 50%, 纵向铺设           | 1.85                         | 860~895        | 720            | 390                                               | 38           | 20.5                                            | 0.07            |
| 玻璃/聚酯层压板   | 50%, 其中 80%<br>纵向铺设 | 1.85                         | 690~720        | 580            | 310                                               | 33.5         | 18.0                                            | 0.10            |
| 碳纤维/环氧层压板  | 60%, 单向铺设           | 1.58                         | 1 830          | 1 100          | 700                                               | 142          | 90.0                                            | 0.12            |
| 桃花心木/环氧层积材 |                     | 0.55                         | 82             | 50             | 90                                                | 10           | 18.0                                            | 4.00            |
| 桦木/环氧层积材   |                     | 0.67                         | 117            | 81             | 121                                               | 15           | 22.5                                            | 2.30            |
| 一级杉木/环氧层积材 |                     | 0.79                         | 123            | 82             | 104                                               | 18           | 22.8                                            | 2.68            |
| 二级杉木/环氧层积材 |                     | 0.79                         | 89             | 74             | 94                                                | 10           | 12.7                                            | 1.83            |
| 三级杉木/环氧层积材 |                     | 0.78                         | 61             | 57             | 73                                                | 7            | 9.0                                             | 2.15            |

注: 除分级杉木/环氧层积材以外, 其他材料的数据引自文献 6。以下同。

比刚度决定叶片的自然频率。除了碳纤维/环氧层压板和二、三级杉木/环氧层积材以外, 其他材料的比刚度都在 18~27 GPa 范围内, 说明一级杉木/环氧层积材完全能够适应叶片在自然频率状态下的使用。

从各项指标综合考虑, 力学性能最高的材料是碳纤维复合材料, 但其成本亦比其他材料高(大约 50 万元/t), 不能普遍使用。仅仅从材料学的角度来看, 可替代的材料首先是玻璃/聚酯层压板, 其次才是玻璃/环氧层压板和木材/环氧层积材<sup>[6]</sup>。

玻璃和碳纤维复合材料适于在半模中, 用湿法铺层制成翼形轮廓、平面形状和扭角。用同样的方式可以制造木材层积材叶片, 但应限制层积材的厚度, 以保证风电叶片曲率符合施工要求<sup>[6]</sup>。

从表 1 可知, 各级杉木/环氧层积材叶片材料的密度接近, 略高于桃花心木(*Swietenia mahagoni*)/环氧和桦木(*Betula* spp.)/环氧层积材, 大大低于玻璃/聚酯、玻璃/环氧、碳纤维/环氧材料。

一级杉木层积材制成的风电叶片, 其最大拉伸强度虽低于玻璃/聚酯、玻璃/环氧、碳纤维/环氧材料, 仍高于桃花心木/环氧层积材和桦木/环氧层积材; 二级杉木层积材风电叶片, 其最大拉伸强度介于桦木/环氧层积材和桃花心木/环氧层积材之间; 最大压缩强度与拉伸强度亦类似。

在杨氏模量方面, 一级杉木层积材高于桃花心木/环氧层积材和桦木/环氧层积材, 二级杉木层积材低于桦木/环氧层积材, 与桃花心木/环氧层积材持平。

表 2 分级杉木复合材料与常规无接头木材/环氧层积材的比较  
Tab. 2 Comparison between *Cunninghamia lanceolata* composite materials and the conventional clear wood/ epoxy laminate materials

| 样本     | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 顺纹拉伸<br>强度/MPa | 顺纹均压缩<br>强度/MPa | 顺纹杨氏<br>模量/GPa | 剪切强<br>度/MPa |
|--------|------------------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|
| 桃花心木   | 0.55                         | 82             | 50              | 10             | 9.5          |
| 花旗松    | 0.58                         | 100            | 61              | 15             | 12           |
| 白杨     | 0.45                         | 63             | 52              | 10             | 9            |
| 波罗的海松木 | 0.55                         | 105            | 40              | 16             | —            |
| 白桦     | 0.67                         | 117            | 81              | 15             | 16           |
| 山毛榉    | 0.72                         | 103            | 69              | 10             | 16           |
| 一级杉木   | 0.79                         | 123            | 82              | 18             | 16           |
| 二级杉木   | 0.79                         | 89             | 74              | 10             | 13           |
| 三级杉木   | 0.78                         | 61             | 57              | 7              | 10.5         |

通过以上的比较可见,由一、二级杉木层积材制成的复合材料,完全能够满足风电叶片材料物理力学性能的要求。

2.2 分级杉木复合材料与常规无接头木材/环氧层积材的比较

尽管木材/环氧层积材被认为是复合材料,但是和 GFRP(玻璃纤维/环氧材料)有明显不同。其单层由木单板组成,代替了基体上的合成纤维;环氧树脂胶将相邻层单板胶接起来,但非基体,因此,木材/环氧层积材复合材料的纤维体积含量接近 100%。由于木材本身的各向异性,影响到木材层积材同样具有各向异性特征。所以,设计时需要重点考虑木材强度的变异性;要对木材原料进行分级,以减轻和克服强度异性。

表 2 列出了分级杉木层积材风电叶片复合材料,同其他已利用的木材层积材性能的比较。桃花心木、花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)过去分别是英国和美国采用的主要叶片制造材料,但是环境压力导致逐渐淘汰了桃花心木,开始更多地利用欧洲树种,如白杨(*Populus tomentosa*)、波罗的海松木(*Pinus sylvestris*)、白桦(*Betula platyphylla*)和山毛榉(*Fagus longipetiolate*)。

由表 2 可知,由一、二级杉木层积材制成的风电叶片复合材料,不仅密度高于其他木材/环氧层积材,而且其顺纹拉伸强度、压缩强度、杨氏模量、剪切强度等,均达到或超过其他木材/环氧层积材,完全能够替代目前大量使用的玻璃钢叶片材料。

- 3 结论
- 1) 试验室制备的一、二级杉木单板层积材风电叶片复合材料,其物理力学性能可达到甚至超过国外成熟的木材/环氧层积材风电叶片复合材料,完全能够替代目前大量使用的玻璃钢叶片材料。

2) 分级杉木单板层积材在顺纹方向上的性能较好,为了有效地抵抗风力发电机叶片弯曲载荷,应按其木纹平行于叶片轴向安装。然而,层积材的最大生产长度为 2.5 m,横向接头是其作为风电叶片复合材料增强相的弱点。

因此,还需进一步研究如何利用接头交错或使用嵌接接头,以保证层积材在长度方向上的均匀性,减少由横向接头引发的不良效果。

3) 本研究离工业化生产尚有一定差距。若要实现分级杉木单板层积材在风电叶片上的商业化开发,尚有大量的工作进行。

参考文献:

[1] 江泽慧,孙正军,任海青. 先进生物物质复合材料在风电叶片中的应用[J]. 复合材料学报,2006,26(3):127-129.

[2] 黄晓东,江泽慧,孙正军. 风机叶片的发展概况和趋势[J]. 太阳能,2007(4):37-39.

[3] George Marsh. The large developments and trends of wind turbine blades [J]. Reinforced plastics,2003,47(3):10.

[4] George Marsh. Composite material; The first realization of wind energy[J]. Reinforced Plastics, 2003, 47(5): 29.

[5] 彭镇华. 中国杉树[M]. 北京:中国林业出版社,1999.

[6] (美)Tony Burton. 风能技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[7] Designation:D3500-90 (Reapproved 2003),Standard Test Methods for Structural Panels in Tension[S].

[8] Lieblein S, Gougeon M, Thomas G, et al. Design and evaluation of low-cost laminated wood composite blades for intermediate size wind turbines; Blade design, fabrication concept and cost analysis[R]. Washington,1982. DOE/NASA/0101-1, NASA CR-165463.

[9] Lark R F, Gougeon M G, Thomas G, et al. Fabrication of low-cost mod-0a wood composite wind turbine blades[R]. United States, 1983, DOE/NASA/20320-45, NASA TM-83323.

(责任编辑 向 琴)