

分级杉木风电叶片复合材料的制备与研究

黄晓东¹, 江泽慧^{1,2}, 任海青², 陈玲²

(1. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:以杉木为原料, 通过杉木分级、优选制成杉木薄板层积材, 利用 INSTRON 5582 万能力学试验机进行检测。试验结果表明: 由一、二级分级杉木制成的风电叶片复合材料的物理力学性能均达到或超过目前国外风电叶片在用的常规木材/环氧层积材的特性, 完全能够替代目前大量使用的玻璃钢叶片材料。

关键词:薄板层积材; 风力发电机叶片; 复合材料; 杉木分级

中图分类号: S781.6

文献标识码: A

Study on the preparing wind turbine blades composite materials from grading *Cunninghamia lanceolata*

HUANG Xiao-dong¹, JIANG Ze-hui^{1,2}, REN Hai-qing², CHEN Ling²

(1. Research Institute of International Center for Bamboo and Rattan (ICBR), Beijing 100102, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In the paper, the laminated veneer lumber (LVL) were made from grading *Cunninghamia lanceolata*. The wind turbine blades composite materials were tested by INSTRON 5582. The results showed that mechanical properties of wind turbine blades composite materials made of first and second grading *Cunninghamia lanceolata* could met or exceeded wood / epoxy laminated used in the world. It can substitute FRP blades materials in the further.

Keywords: laminated veneer lumber; wind turbine blades; composite material; grading *Cunninghamia lanceolata*

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^[1,2]。这种材料虽然制造工艺成熟, 但存在成本高(10~20万元/t)的问题, 且玻璃钢的废旧产品处理困难, 既难以燃烧, 又不易分解, 国外多采用堆积方式处理, 占用了大量的土地^[3]。因此, 必须开发出一种新的低成本、可回收利用的环保叶片来替代目前大量使用的玻璃钢叶片^[4]。Gougeon M 和 Zuteck M^[5]等人发现花旗松木层积材/环氧复合材料可很好地满足 Mod-0A 风力发电机叶片的结构要求, 但由于原料来源受限制, 无法大批量使用^[6]。

杉木作为我国南方广泛生长的主要木材品种之一, 其来源广泛, 木材蓄材量大, 生长相对较快, 同时具有良好的防腐性能, 其密度低, 顺纹抗拉强度高^[7]。但顺纹方向的抗压强度相对较低, 可以考虑通过杉木重组的方式提高杉木的使用性能, 从而替换造价较高的玻璃钢复合材料和原料稀少的花旗松、桦木/环氧层积材料。

复合材料中增强体物理力学性能的高低会直接影响复合材料的性能, 产生不同宏观性能^[8,9]。要生产具有优良物理力学性能的复合材料, 就必须使加入的增强相具有最好的力学性能。在制备风力发电机叶片复合材料的过程中, 为了使加入的增强相(杉木)具有最好的力学性能, 必需对该材料按力学性能的大小进行分级, 做到优材优用。

收稿日期: 2007-12-28

作者简介: 黄晓东(1966-), 男, 博士研究生, 讲师; 通讯联系人: 江泽慧, 教授, 国际竹藤网络中心董事会主席, 中国林业科学研究院首席科学家。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2007J0195)

1 材料与方法

1.1 实验材料

本批次杉木原木采自湖南省绥宁县寨市林场,树龄在40年以上,直径在30 cm以上,树干通直,外观无缺陷(腐朽、弯曲等)的新伐材;通过“米”字型下料,剔除芯材;锯解标准杉木边材径切板毛坯,在干燥窑里烘干至含水率低于12%,剔除各种木材缺陷,精加工制成500 mm × 20 mm × 20 mm(长×宽×厚)标准杉木边材径切规格板,备用。

1.2 实验方法

参照ISO 3349-1975 木材-静力弯曲弹性模量国际标准的要求测定规格板的弯曲弹性模量,并按测得的弯曲弹性模量值大小将检测的规格板分成三级: $E_w > 12$ GPa,一级; 12 GPa $\geq E_w \geq 10$ GPa,二级; $E_w < 10$ GPa,三级。

将双组分合成乳胶(LK-DN60)按配比(重量)合成 $W_{\text{乳胶}}:W_{\text{固化剂}}=100:15$ 配好调匀,再分别对分级后的三种杉木边材径切规格板进行涂胶组坯,涂胶量为 170 g/m²(单面),陈化时间为10 min,组坯方式如图1所示。采用三层以上的组坯结构时要避免由于拼接缝的重叠而造成脱胶现象,应相互错开胶接缝胶合。

将按不同等级杉木规格板组坯好的木方送入冷压机冷压成型,压力为1.0 MPa,时间为90 min。将成型后的木方径向刨切成1 mm厚的杉木单板,备用。

调制浸渍环氧混合树脂,配比为:618环氧树脂50%,SK3环氧树脂30%,2124酚醛树脂20%。将加工好的分级杉木单板浸入,时间为15 min,树脂的浸渍量约为30%左右。陈化1 h左右,把杉木单板放入烘箱低温干燥后取出,备用。

将浸渍好环氧混合树脂的分级杉木单板分别组坯,组坯厚度为40 mm,组坯的压缩率为55%,热压机进行热压前,热压机垫板的上、下两层还必须涂1 000厘泊硅油脱模,以防止热压过程中可能产生的粘板对热平板造成损坏。热压温度为120 ℃,压力为15 MPa,热压时间为100 min。

1.3 测试方法及仪器

将加工好的由分级杉木制成的杉木薄板层积材(长×宽×厚=500 mm × 200 mm × 22 mm)取出,放置24 h后,分别按GB1935-91(木材顺纹抗压强度试验方法)和D3500-90(Reapproved 2003)(Standard Test Methods for Structural Panels in Tension, ASTM(美国试验材料学会) Designation)的要求加工试件,各种试件的检测在INSTRON 5582万能力学试验机上进行。

2 结果与讨论

2.1 分级杉木叶片复合材料与常规叶片材料结构特性的比较

由分级杉木制成的风力发电叶片复合材料与常规风力发电叶片材料的结构特性比较见表1。从表1可知,由一级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料在最大拉伸强度方面虽然低于玻璃/聚酯、玻璃/环氧、碳纤维/环氧、高屈服钢和可焊铝合金材料制成的风力发电叶片材料,但仍高于卡欧属/环氧层板和桦木/环氧层板的最大拉伸强度,二、三级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料在最大拉伸强度方面低于桦木/环氧层板,但仍高于卡欧属/环氧层板的最大拉伸强度,在最大压缩强度性能方面也有类似的情况;由一、二、三级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料在密度方面变化不大,略高于卡欧属/环氧层板和桦木/环氧层板,大大低于玻璃/聚酯、玻璃/环氧、碳纤维/环氧、高屈服钢和可焊铝合金材料制成的风力发电叶片材料的密度;在材料的杨氏模量性能方面,一级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料的杨氏模量值高于卡欧属/环氧层板和桦木/环氧层板,二级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料的杨氏模量值

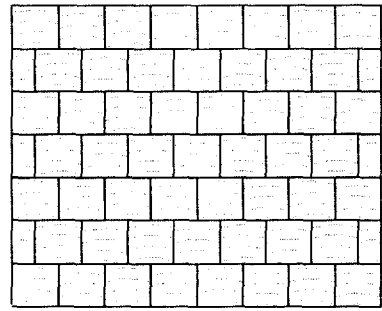


图1 杉木边材径切板组坯方式

Fig. 1 The assembly pattern of grading *Cunninghamia lanceolata* material

低于桦木/环氧层板,与卡欧属/环氧层板的杨氏模量值持平;在材料的比刚度质量性能方面,一级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料的比刚度质量性能除较低于该项性能较高的碳纤维/环氧(以 60% 纤维体积含量及单向铺设)所制成的复合材料性能外,略低于高屈服钢和可焊铝合金材料制成的风力发电叶片材料,略高于玻璃/聚酯(以 50% 纤维体积分含量的 UD 铺设)、玻璃/环氧(以 50% 纤维体积分含量及 UD 铺设)和桦木/环氧层板所制成的风力发电叶片复合材料性能,而由二、三级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料在比刚度质量性能方面都低于桦木/环氧层板和卡欧属/环氧层板;在材料的壁板稳定性参数性能方面,由一、二、三级分级杉木制成的风力发电叶片复合材料均较高,除略低于卡欧属/环氧层板外,与桦木/环氧层板相当,而高于其它材料,具有一定的优势。

表 1 分级杉木复合材料与常规叶片材料的结构特性比较

Tab. 1 Comparison of mechanical properties between grading *Cunninghamia lanceolata* composite material and the conventional blades composite material

编号	材 料	最大拉伸	最大压缩	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E/GPa	S_{UC}/ρ	E/ρ	E/S_{UC}^2
		强度 ^② S_{UT}/MPa	强度 ^② S_{UC}/MPa					
1	玻璃/聚酯(以 50% 纤维体积分含量的 UD ^① 铺设)	860 ~ 900	720	1.85	38	390	20.5	0.07
2	玻璃/环氧(以 50% 纤维体积分含量的 UD 铺设)	860 ~ 895	720	1.85	38	390	20.5	0.07
3	玻璃/聚酯层压板(以 50% 纤维的容积含量和 80% 的纤维沿纵向铺设)	690 ~ 720	580	1.85	33.5	310	18	0.1
4	碳纤维/环氧(以 60% 纤维体积分含量及单向铺设)	1830	1100	1.58	142	700	90	0.12
5	卡欧属/环氧层压板	82	50	0.55	10	90	18	4
6	桦木/环氧层压板	117	81	0.67	15	121	22.5	2.3
7	高屈服钢(球铁 510)	510	510	7.85	210	65	27	0.81
8	可焊铝合金 AA6082(H30)	295	295	2.71	69	109	25.5	0.79
9	三级杉木/环氧层压板	123	82	0.79	18	104	22.8	2.68
10	二级杉木/环氧层压板	89	74	0.79	10	94	12.7	1.83
11	三级杉木/环氧层压板	61	57	0.78	7	73	9	2.15

注: ①UD 表示单一方向; ②复合材料的最大拉伸强度与最大压缩强度值取各试件的平均值,金属材料最大拉伸强度与最大压缩强度值取各试件的最小值

2.2 分级杉木复合材料与常规无接头木材/环氧层积材的特性比较

表 2 给出了风电叶片复合材料中已利用的木材层压板与分级杉木层压板特性的比较。卡欧属和花旗松过去分别是英国和美国用于叶片制造的主要种类,但在环境压力下逐渐被淘汰,现在更多地利用的是欧洲的树种,如白杨和白桦。

由表 2 可知,由一、二级分级杉木制成的风电叶片复合材料,除了在密度方面略高于其它材料制成的木材/环氧层积材,其它参数,如沿木纹方向的平均拉伸强度、平均压缩强度、杨氏模量和剪切强度均达到或超过目前国外风电叶片在用的常规无接头木材/环氧层积材的特性,完全能够替代目前大量使用的玻璃钢叶片材料。

表2 分级杉木复合材料与常规无接头木材/环氧层积材的特性比较

Tab.2 Comparison of mechanical properties between grading *Cunninghamia lanceolata* composite material and the conventional no-joint wood/ epoxy laminated

样 本	$d/g \cdot cm^{-3}$	$S_{平均拉伸}/MPa$	$S_{平均压缩}/MPa$	E/GPa	$S_{剪切}/MPa$
桃花心木 ^[10]	0.55	82	50	10	9.5
白杨	0.45	63	52	10	9
波罗的海松树	0.55	105	40	16	-
白桦	0.67	117	81	15	16
山毛榉	0.72	103	69	10	16
花旗松	0.58	100	61	15	12
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

3 结语

1) 杉木来源广泛、木材蓄材量大、生长相对较快,同时又具有密度低、强度和模量高的特点,比较适合作为复合材料的增强相。

2) 由一、二级分级杉木制成的风电叶片复合材料,除了在密度方面略高于其它材料制成的木材/环氧层积材(与 GFRP 和 CFRP 密度相比仍然很低),其它参数,如沿木纹方向的平均拉伸强度、平均压缩强度、杨氏模量和剪切强度均达到或超过目前国外风电叶片在用的常规无接头木材/环氧层积材的特性。

3) 由杉木层积材研制的风力发电叶片生物质复合材料具有机械性能好、加工性能好和产品重量轻价格低等优点,具有广阔的应用前景。

致谢: 苏团、张春祥同学参加了本课题研究的部分工作,特此表示感谢。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杰克·派克. 风能及其利用[M]. 李海东译. 北京: 能源出版社, 1984.
- [3] George M. The large developments and trends of wind turbine blades[J]. Reinforced Plastics, 2003, 47(3): 10.
- [4] 李亚西,武鑫,赵斌,等. 世界风力风电现状及发展趋势[J]. 太阳能, 2004(1): 6-7.
- [5] Gougeon M, Zuteck M. The use of wood for wind turbine blade construction. Large wind turbine design characteristics and R&D requirements[R]. Washington: NASA CP-2106, CONF-7904111, 1979.
- [6] 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: NASA CR-165463, 1982.
- [7] 彭镇华. 中国杉树[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [8] George M. Composite material—the first realization of wind energy[J]. Reinforced Plastics, 2003, 47(5): 29.
- [9] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] Tony Burton. 风能技术[M]. 武鑫译. 北京: 科学出版社, 1997.

(责任编辑: 杨青)