

文章编号: 1000-3851(2006)03-0127-03

先进生物质复合材料在风电叶片中的应用

江泽慧, 孙正军, 任海青*

(国际竹藤网络中心, 北京 100102)

摘要: 竹材是生长速度快、性能好的生物质材料之一。由于竹材外侧性能远高于内侧, 采用分级加工方法可制备由外侧到内侧的 A、B、C、D 级竹层积材。通过与其他风电叶片材料比较, A 级竹层积材的性能超过了目前风电叶片使用的木层积材, 与玻璃纤维增强塑料的性能接近。用这种先进生物质复合材料制作的新一代风电叶片, 具有可再生性、加工消耗能源少、无废弃物、成本低、废旧产品易于处理等一系列优点。

关键词: 风电叶片; 先进生物质复合材料; 分级竹材; 竹层积材。

中图分类号: TS653; S781 **文献标识码:** A

Application of advanced bio-composites in wind blades

JIANG Zehui, SUN Zhengjun, REN Haiqing*

(International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: Bamboos, a kind of bio-materials, grow fast and have good mechanical behaviors. The properties of outside strip of bamboo are better than those of inside, so the grading process was developed, which can make the laminated bamboo strip lumber (LSBL) of grading A, B, C and D. The advanced bio-composites, compared with other materials, can replace GFRP and wood/epoxy, and can be used in wind blades as a new generation of materials. This new materials have many advantages, such as renewable, less dissipation of energy, low cost, no waste and the worn-out products can be disposed easily.

Keywords: wind blade; advanced bio-composite; bamboo grading process; laminated bamboo strip lumber

风能利用的历史可以追溯到古埃及的英雄亚历山大, 他利用风能制作了管风琴。公元前十七世纪, 古巴比伦皇帝哈姆拉比用风能从事农田的灌溉。公元七世纪, 古波斯人建造了第一座风车用于谷物磨粉。但广泛使用风车是从十三世纪开始, 在十八世纪开始普及, 十九世纪末, 欧洲有超过三万个风车, 用于加工谷物和灌溉。

1888 年世界第一座风力发电机由 Charles F. Brush 在美国俄亥俄州克利夫兰建造。发电容量为 12 kW, 风机直径 17 m, 叶片使用雪松(cedar)制成, 有 144 个叶片。

现代风力发电技术, 涉及空气动力、结构设计、材料工程、精密机械、电器、控制、联网领域等。目前风电机组存在成本高、风机运行时噪音大, 加之大量使用无法回收的玻璃纤维增强塑料(GFRP)制作叶片, 给环境带来不利影响等问题。

生物质复合材料是指用动物和植物为原料制造

的复合材料, 其性能与玻璃纤维增强塑料(GFRP)相比还有一定的差距。

先进生物质复合材料则是以径向分级、密实化、蒸汽氧化等方法进行性能改进后的生物质复合材料。将其用于风电叶片结构, 性能与 GFRP 相近, 具有成本低、可再生性好、废旧产品易处理、可持续使用等优点。

1 风电叶片结构与材料

风电叶片主要材料为 GFRP, 也有少量的木质叶片。美国能源部桑迪亚国家实验室(Sandia)在 2002 年研制的风电叶片结构和材料^[1]如图 1 所示。

叶片的前后端由 GFRP 蒙皮和轻木(balsa core)制作。叶片的中部为箱形梁, 由 GFRP 上下翼梁(spar capes)和前后腹板(shear web)组成。所使用的材料如表 1 所示。

蒙皮和翼梁使用 E 玻璃纤维/环氧复合材料;

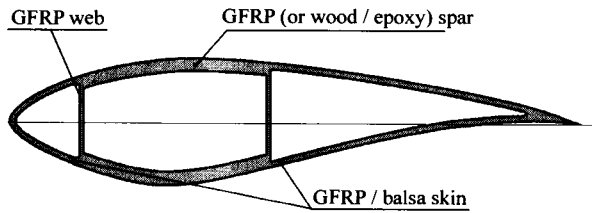


图1 风电叶片的结构与使用材料
Fig. 1 Structure and materials of wind blades

三向编织复合材料(CDB340)各向材料的质量比分别为25%、25%、50%，方向为+45°、-45°、0°。翼梁为三向和单向GFRP(A260)的混合，质量分别为30%和70%，各种材料的性能见表2。

表中 E_x 、 E_y 、 G_{xy} 分别为纵向、横向模量和剪切模量， ν_{xy} 、 V_f 和 ρ 分别为泊松比、纤维体积分含量和密度。

从GFRP叶片使用的材料来看，蒙皮厚度为3~4 mm，占总质量较少份额；轻木的密度低，占总质量份额也很少；翼梁占了总质量的大部分，而单向GFRP(A260)占其中70%。

由于GFRP连接困难，风电叶片主要采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)方式制作。单向、三维织物和翼梁纤维体积分含量为40%。各种性能均低于模压成型的E玻璃纤维/环氧复合材料。

风力发电是可持续的产业之一，但目前使用的GFRP叶片则属于不可持续发展材料。由于风电叶

片的尺寸越来越大，数量激增，给环境造成的影响不可忽视。无法持续发展成为GFRP叶片最大的隐忧。

GFRP难以燃烧，基体材料又不易分解，废旧产品的处理十分困难。复合材料又被称为占地材料(field fill)，废旧产品需要大量土地堆放。从可持续发展角度看，大量大尺寸的废旧GFRP风电叶片的堆放，需要耗费大量的土地资源。

我国对电力的需求量大，可以预见未来将大规模生产风电叶片。如果发展GFRP叶片，对环境的危害较大，应未雨绸缪，研制环保、可持续发展的新型叶片材料。研制具有我国自主知识产权的先进生物质复合材料是解决这一难题的途径之一，也是发展我国风电技术，使之达到世界先进水平的关键技术之一。

风电叶片使用生物质材料有几种优点：刚度高、稳定性好、低温阻尼好、成本低，适合于大型叶片。从工艺上看，由于竹材的用量高达50%~70%，环氧树脂用量少，避免了固化过程的过热反应，材料的收缩小。与GFRP叶片相比较，减少了加工时间，更具有市场竞争能力。

2 先进生物质复合材料及在叶片中的应用

竹材是性能最好、也是生长最快的生物质材料之一。根据江泽慧主编的世界竹藤^[2]介绍，全世界共有竹类植物70余属，1200多种。根据竹材径向

表1 风电叶片各层使用材料^[1]
Table 1 Materials in wind blade's layers

Layer	1	2	3	4	5
Material 1	Epoxy gelcoat	GFSCM*	3-D fabric	Balsa	3-D fabric
Material 2	Epoxy gelcoat	GFSCM*	3-D fabric	GFRP spar	3-D fabric
Thickness/mm	0.51	0.38	1.27	—	1.27

* GFSCM: glass fiber short cut mat

表2 风电叶片使用材料性质^[1]
Table 2 Material properties in wind blades

	A260	CDB340	GFRP spar	GFSCM	Balsa	Gelcoat	Epoxy
Longitudinal modulus /GPa	31.0	24.2	25.0	9.65	2.07	3.44	2.76
Transverse modulus /GPa	7.59	8.97	9.23	9.65	2.07	3.44	2.76
Shear modulus/GPa	3.52	4.97	5.00	3.86	0.14	1.38	1.10
Poisson ratio	0.31	0.39	0.35	0.30	0.22	0.30	0.30
Fiber volume fraction/%	40	40	40	—	—	—	—
Density/(g·cm ⁻³)	1.75	1.75	1.75	1.67	0.14	1.23	1.15

差异大的特点, 本课题组研究了竹材的加工分级方法^[3,4]。竹材分为 A, B, C, D 四级, A 级性能最好。制造分级竹篾层积材(LSBL)的主要工艺路线如图 2 所示。

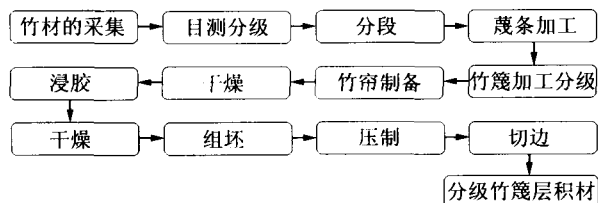


图 2 分级竹层积材的制造工艺路线

Fig. 2 Process of grading laminated bamboo lumber

参照日本 JAS SLVL STANDARD—1993 试验标准对 A、B、C、D 分级竹篾层压板和混合板进行了物理和力学性能试验, 结果见表 3。

表 3 分级竹篾层压板的力学性能

Table 3 Mechanical properties of grading LSBL

Property	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Hybrid
Shear strength/MPa	15.87	24.72	16.68	14.70	14.38
Bend strength/MPa	168.67	146.17	123.83	87.83	125.00
Bend modulus/MPa	17833	13000	10017	7433	12233

参照美国 ASTM D 3500—90 进行了拉伸和压缩试验, 结果见表 4。

表 4 A 级竹篾层压板的拉伸和压缩性能

Table 4 Tensile and Compressive properties of Grade A LSBL

Property	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Compressive strength/MPa	Compressive modulus/GPa
Mean value	200.67	21.17	124.13	20.54
Standard deviation	34.47	1.75	9.51	2.05
Discrete coefficient	17.18	8.24	7.70	1.00

A 级竹篾层积材和其他叶片材料性能比较见表 5。

从比模量角度看, A 级竹篾层积材的性能高,

表 5 风电叶片使用材料性能的比较

Table 5 Properties comparison of wind blade's materials

	A260(GFRP)	Birch LVL	Grade A LSBL
Relative density	1.75	0.70	0.98
Tensile modulus/GPa	31.0	13.8	21.2
Tensile strength/MPa	977.0	29.0	200.6
Compressive strength/MPa	559.0	29.6	124.1
Specific modulus	17.7	19.7	21.6
Specific strength	558.3	41.4	204.7

替代单向 GFRP 无任何问题。从比强度角度看, A 级竹层积材为 GFRP 的 36.6%, 基本达到相同数量级。

最初的风电叶片使用木材为原料, 可称为第一代叶片材料。80 年代发展的 GFRP 和桦木层积材叶片为第二代叶片材料。以改性方法制作的先进生物质复合材料为第三代叶片材料, 具有性能好、废旧产品易于处理等优点。开发新一代的生物质复合材料风电叶片将成为一个重要的研究方向。

3 结论

分级竹篾层积材具有良好的性能, 比模量已超过 GFRP, 比强度也达到与其相同的数量级。通过与目前风电叶片使用的 GFRP 和木层积材性能相比较, 竹质增强材料具有性能优良、可再生、加工消耗能源少、无废弃物、废旧产品易于处理等优点, 可替代 GFRP 制作新型的风电叶片。

参考文献:

[1] Dayton A. Griffin Blade System Design Studies. Vol. 1, Composite Technologies for Large Wind Turbine Blades [R]. SAND2002—1879, Kirkland, Washington: Global Energy Concepts LLC, 2002: 16—17.

[2] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳: 辽宁科学出版社, 2002: 1—2.

[3] 江泽慧, 孙正军, 费本华, 郭起荣. 分级竹层积材的湿胀性研究[J], 江西农业大学学报, 2004, 12: 25.
Jiang Zehui, Sun Zhengjun, Fei Benhua, Guo Qirong. Swelling property of grading bamboo strand lamination [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 12: 25.

[4] 江泽慧, 孙正军. 竹层积材的分级生产方法及其产品的用途: 中国, 2004100009571.8 [P]. 2004—09—08.