

# 竹层积材在大型风力机叶片 设计中的应用研究\*

王 琰<sup>1</sup>, 李 慧<sup>2</sup>, 王同光<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016;  
2. 无锡风电设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214174)

**摘要:** 从大型风力机竹叶片设计的材料及结构角度出发,首先简要介绍了作为竹叶片主增加材料——竹层积材的力学性能实验及其基本的力学特性.随后基于这些性能数据,给出了一种常规形式的1.5 MW竹叶片的气动和结构设计方法,并重点阐述了竹叶片的结构铺层方法和关键的技术细节,最后简要概述了目前竹叶片设计还需要解决的技术问题.

**关键词:** 竹叶片; 竹层积材; 力学性能试验

**中图分类号:** TM614; O346      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.004

## 引 言

目前,兆瓦级陆上大型风力机叶片的成本约占整机的20%~30%.因此,研究和寻找成本更低、更加环保的新型叶片材料对降低风力发电成本和提高风电竞争力有着重要的意义.目前,大型风力机叶片主流是比强度高、热稳定性好、抗疲劳和抗冲击性能优良、可设计性强的玻璃纤维复合材料,其主要增强材料为无碱玻璃纤维(简称玻纤),基体通常采用不饱和聚酯树脂(unsaturated polyester resin, UPR)或环氧树脂(epoxy resin, EPR)<sup>[1]</sup>.此外,增强材料还可选用碳纤维、木-环氧和竹材.玻纤的化学性能、物理性能和力学性能稳定,但其难以降解,回收困难,且成本降低空间有限.碳纤维具有强度大、密度低、力学性能比玻璃纤维更加优异等优势,但价格过高,限制了其在叶片中的使用<sup>[2]</sup>.木-环氧主要是基于芬兰桦木,且该技术为Vestas专有,中国缺少实施条件和基础.中国的竹林面积约有800万hm<sup>2</sup>,占世界竹林总面积的40%,资源充足,且我国的竹材拥有比木材更好的力学性能.如果竹层积材结构及其竹叶片设计合理,可较大地降低成本,且便于降解回收,适合多种规格风电机组产品的设计应用.因此在日益关

\* 收稿日期: 2013-04-23; 修订日期: 2013-09-06

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046200);中央高校基本科研业务费专项资金(NP2012102;NJ20130007;NJ20130008;NJ20130009);江苏高校优势学科建设工程资助项目

**作者简介:** 王琰(1982—),男,江苏淮安人,博士生(Tel: +86-25-84892069; E-mail: wl2007@nuaa.edu.cn);  
王同光(1962—),男,博士,教授(通讯作者.Tel: +86-25-84896138; E-mail: tggwang@nuaa.edu.cn).

注环境保护的今天,大型风力机竹叶片的研究具有很高的经济和环保价值,并有望成为我国新一代风力机叶片制造的重要主材之一。

本文首先从竹叶片主增强材料——竹层积材的力学性能实验出发,探讨了竹层积材力学性能的基本特征,以此为基础,开展了 1.5 MW 大型风力机竹叶片的结构设计,介绍了其结构铺层中的一些关键技术,最后还简要地总结了目前竹叶片研究中的一些技术难点及其研究方向。

## 1 竹层积材的力学性能实验

大型风力机竹叶片采用经过特殊工艺处理的竹层积材作为主增强材料。竹层积材是由竹龄为 4~7 年的中段竹子加工成多层厚度非常薄、性能优良的竹篾,采用特殊工艺压制成型,并按照要求制作成不同规格的形式。与玻璃纤维的力学性能需求相同,竹层积材作为大型风力机叶片主要承力构件的主材,承受拉伸和压缩载荷作用,其密度和含胶量等物理性能,各向异性的强度、刚度、Poisson 比等静力学性能,疲劳性能以及竹叶片特有的斜接竹材的性能,都需要严格按照标准的测试规范来获取。为了获取这些性能的数据,本文选取了长度 500~2 000 mm,宽度 5~22 mm,厚度 1~3 mm 的竹片,并压制成为厚度为 20~50 mm 的竹层积材,用来制作力学性能实验的试件。

### 1.1 静力学性能

竹层积材静力学性能试验主要包括拉伸和压缩试验,并分别严格按照层合板结构抗拉试验方法测试标准 (ASTM D 3500-2003) 和层合板结构压缩试验方法测试标准 (ASTM D 3501-2005) 的要求完成,拉伸和压缩后部分试验件如图 1 所示。



图 1 竹层积材性能实验的试件

Fig.1 Specimens of bamboo-based laminates for property test

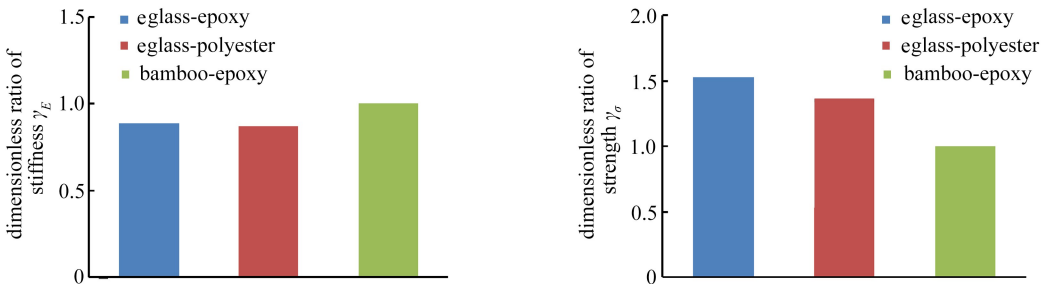


图 2 竹层积材与单向玻璃纤维的比刚度和比强度对比

Fig.2 Comparison of stiffness and strength between bamboo-based laminates and unidirectional glass fiber reinforced laminates

图 2 给出了竹层积材与环氧树脂压制成型后,与不同树脂类型单向玻纤的无量纲比刚度和比强度的比较(取竹层积材的性能为 1)。可以看出,竹层积材的比刚度要优于环氧型和不饱和型单向玻纤,从而保证了在同等级载荷和重量约束限制下,竹叶片的叶尖挠度小于玻璃纤维叶片,而比强度则相对较低。对于兆瓦级大型风力机叶片设计来说,刚度及抗屈曲特性设计要优先于强度设计,且在保证重量等效的情况下,竹叶片可通过竹层积材与玻璃纤维形成层合板结构来提高强度。由此可见,竹层积材应用于大型风力机的叶片设计是可行的。

与玻纤不同,竹层积材的随形性和可加工性较差,因此压制成型后的竹材不宜过长,这就使得竹叶片在生产过程中存在大量搭接部分,并由此产生特有的斜接问题。由于在竹层积材斜接处容易存在连接空隙,造成树脂堆积,加之工艺操作复杂,因此斜接段的力学性能显著降低,进而会影响竹叶片的整体性能。斜接段的静力学实验主要是为了获取竹层积材斜接的力学特性及工艺安全系数。通过开展多组斜接试验试件和工艺试件的拉伸实验来获取强度值和方差,根据数据统计和折算方法得到斜接段的强度特征值,通过与竹层积材的强度特征值对比,进而得到斜接工艺安全系数在 5~6 之间。

## 1.2 疲劳性能

竹层积材的疲劳性能试验分为竹层积材自身以及斜接竹层积材两个部分分别完成。实验依据 GB/T16779-1997 纤维增强塑料层合板拉-拉疲劳性能试验方法,应用 MTS 液压伺服疲劳试验机,并通过计算机进行试验正弦波控制和数据采集,获得在交变应力  $R = -1$  下的竹层积材复合材料与斜接竹层积材复合材料的疲劳 S-N 曲线,如图 3 所示(一个应力周期为 10 N)。由图可以看出,竹层积材在 200 万次寿命处的应力仍能到达 70 MPa 左右,而斜接竹层积材的疲劳性能显著低于竹层积材,在 200 万次时的疲劳性能下降了约 60%,故斜接对竹层积材的疲劳性能产生了重要的影响,因此竹叶片斜接段的设计尤为重要。

## 2 竹叶片的气动-结构设计方法及铺层实现

在试验获取的竹层积材力学性能数据基础之上,本文开展了 1.5 MW 大型风力机竹叶片的设计工作。设计方案采用目前商业上最成熟的水平轴、三叶片、上迎风的型式,风轮的基本参数如表 1 所示。

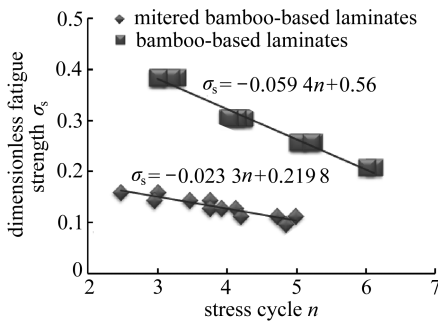


图 3 竹层积材及斜接的疲劳 S-N 曲线

Fig.3 Fatigue S-N curves of standard and mitered bamboo-based laminates

表 1 风轮基本参数

parameter	value
types	upwind/pitch control
wind farm	type III
number of blades	3
radius of rotor $R$ / m	41
rated rotational speed $\Omega$ / (r/min)	18.5
rated power $P_{rate}$ / MW	1.5
cut-in wind speed $V_{in}$ / (m/s)	3
cut-out wind speed $V_{out}$ / (m/s)	25
airfoil family	DU/NACA63 series

## 2.1 气动-结构一体化设计方法

本文的竹叶片设计基于一种新颖的多目标优化设计方法框架<sup>[3-4]</sup>,其不追求单一的目标最优,而是选取两个密切关联又相互冲突的设计目标,即给定风场条件下的风轮年发电量最大和给定结构形式条件下的叶片重量最轻<sup>[5-7]</sup>,再结合高效的改进 NSGA-II 多目标进化算法<sup>[8]</sup>,从而获取这两个目标条件下的综合最优解集,即 Pareto 最优解集,再从中选取合适的叶片最优设计点。

本设计以最佳的空气动力性能首要设计目标,气动特性和性能计算采用了修正的动量叶素 (blade element momentum, BEM) 理论。BEM 理论是一种用于风力机气动性能计算的高效经典理论模型,已成为风力机叶片工程设计和验证的可靠标准模型。在气动优化的同时,还兼顾了叶片的结构优化。叶片采用了双腹板的结构型式,主复合层使用竹层积材与环氧树脂压制成型后的复合材料,内/外蒙皮采用双轴布环氧型玻璃纤维复合材料,填充部分为 PVC 泡沫和 Balsa 木,结构形式示意如图 4 所示。叶片的极限载荷依据 GL 2010 的设计规范要求确定,再以叶片弦向主复合层厚度和位置、尾缘加强层的厚度为变量,以给定铺层形式下的质量最小为优化目标,并采用了薄壁梁自由弯曲的计算方法,结合单目标优化设计算法,可以得到满足强度和刚度要求的最优叶片结构铺层形式<sup>[9]</sup>。

风力机叶片设计的约束条件确定是一个半经验过程。在叶片的气动布局约束方面,叶片仅要求弦长、扭角和绝对厚度从最大厚度处向叶尖递减。同时,为了满足制造要求,采用了四阶自然边界的样条曲线对其形状加以控制,气动和结构共设置了 17 个设计变量,能够很好表达常用的外形和结构铺层形式。除了叶片的几何和结构约束外,输出功率的约束主要是通过变桨操作来完成,使其在大于额定风速后,功率输出始终稳定在额定功率。

本设计在 Pareto 最优解集中选取了气动性能较高的设计点,获得的竹叶片重量为 6 t。叶片从切入风速到 8.5 m/s 风速,始终追踪最优功率系数,风洞实验结果显示此时的最大功率系数可达 0.49(图 5 所示),风轮在 10.5 m/s 时到达额定功率。风轮在大于额定风速后,通过变桨控制使功率输出始终稳定在额定功率。

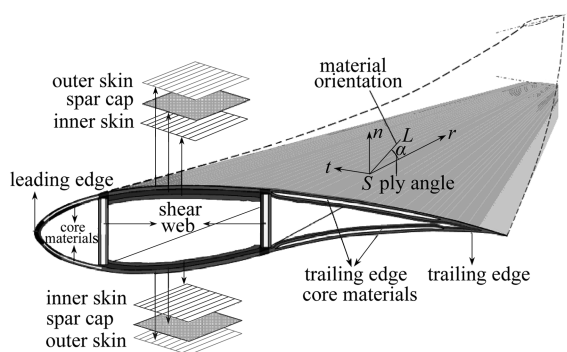


图 4 叶片截面的结构示意图

Fig.4 Structural scheme of the blade section

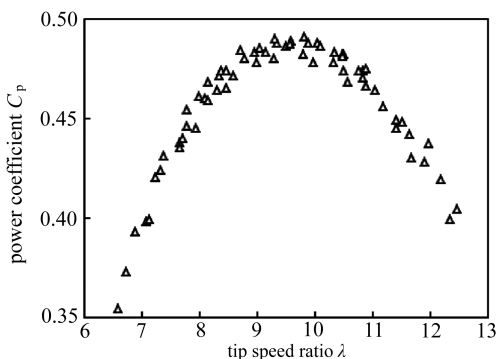


图 5 叶片的功率系数

Fig.5 Power coefficient of the designed blade

## 2.2 结构铺层实现

竹叶片的结构铺层形式与传统的玻璃纤维步骤基本相同,但由于竹层积材的特殊结构形式和性能,这使得其有更多的工艺实施细节需要加以考虑。竹叶片设计中应考虑竹材整体铺设



范围、斜接段、加强层、叶根过渡段、叶尖收尾段和弦向搭接段,不同设计部位的设计内容和侧重点不同,应严格保证叶片整体刚度、强度、竹材间隙、厚度变化及工艺可操作性。

竹层积材主梁以叶片中心线为基准,一般选用等厚不等宽的设计,设计中弦向竹材与竹材之间要求无间隙,这就要求在生产中应严格控制这种间隙,误差在 2 mm 以内,同时考虑到斜接对竹层积材的性能影响,设计中每 4 根竹材只能出现一个斜接。竹叶片主梁应分部位、展向和弦向分别设计,且主梁展向的宽度分布应保证连续无突变,确保叶片挥舞刚度、摆振刚度和扭转刚度分布连续。叶片主梁的铺设宽度由叶根至叶尖逐渐变小,叶根圆柱段满铺竹层积材,至叶中及叶尖宽度连续性递减,本设计竹叶片的主梁铺层形式如图 6 所示。



图 6 竹叶片的主梁铺层形式

Fig.6 Spar structure of the bamboo-based blade

竹叶片的主梁设计还需要在主梁表面增铺单向玻纤以提高整体强度特性,并保证其铺设宽度大于竹材。此时,竹层积材与玻纤之间的层间粘接力、竹材与玻纤突变位置的应力集中、两种材料引入的工艺灌输等复杂性,是设计的难点与重点。竹层积材的上表面可做电晕处理,增加竹层积材表面粗糙度,可提高玻纤布与竹层积材的界面粘接力。

叶根铺设竹层积材,应严格按照叶根竹材套料设计的尺寸规格进行叶根竹材铺设,保证叶根竹材之间、竹材套料与螺栓之间间隙在公差范围内;在叶片的叶尖处,为保证铺层的厚度连续且无阶跃,竹层积材需要从材料厚度均匀过渡至 0,因此叶尖的竹材应进行收尾设计;竹层积材主梁沿叶片展向铺设,在各段搭接夹芯的地方还要进行弦向收边设计,既可以保证竹层积材主梁的宽度连续性变化,又可以控制竹材与夹芯搭接的缝隙。本设计的叶片铺层中,叶根采用 Balsa 芯材,叶中及叶尖采用 PVC 芯材,且整体芯材沿叶片展向的厚度是变化的。芯材与竹层积材搭接中,要保证芯材套料铺设的正确性,必要的时候为保证竹层积材与芯材的间隙在公差范围内,应对芯材进行适当的剪裁。若弦向芯材与竹层积材的厚度差别过大,需要增铺三角形芯材厚度过渡块,确保展向及弦向无厚度突变。

本叶片采用预埋叶根工艺,在叶根法兰盘装好以后,用裁好的玻纤套料,包裹螺栓套,导流毡在底层与螺栓套接触,复合毡在上层且毡面朝上。叶根螺栓为 54×M 30,加上预埋螺栓套构件及螺栓套加强层,叶根预埋螺栓构件的厚度约 60 mm。为保证叶根与法兰及变桨轴承的连接,叶根圆柱段采用双层竹层积材设计,有效提高了叶根刚度和强度。

基于上述的气动-结构设计方法以及结构铺层方法,完成的 1.5 MW 竹叶片样片如图 7。

### 3 竹叶片的结构性能分析

在完成上述竹层积材铺层、主梁表面玻纤增强铺层和其他细节设计后,结合 GL 2010 的极限载荷评估方法、叶片的载荷加载方式,应用有限元软件 MSC.Patran/Nastran 建立了竹叶片的有限元模型、求解及计算方法,对本设计竹叶片的强度、挠度、稳定性、振动特性及疲劳特性进行了分析。

图 8 给出竹叶片的竹材应力云图和整体挠度。在极限载荷作用下,竹叶片的叶尖最大变形

量为 6.43 m, 相比市场典型的 1.5 MW 玻璃钢型叶片的在极限载荷作用下的叶尖挠度小很多。由竹叶片竹材主方向的应力云图可以看出, 竹材的应力分布较连续, 在叶中靠近尾缘芯材搭接处的应力最大, 约为 78 MPa, 小于竹材本身的许用应力。



图7 1.5 MW 竹叶片样片

Fig.7 Prototype of the 1.5 MW bamboo-based blade

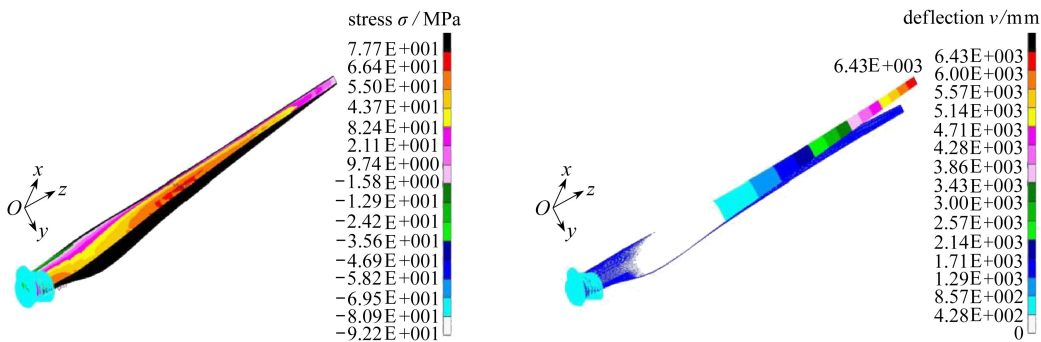


图8 竹叶片竹材应力云图及整体挠度

Fig.8 Stress contour and deflection of the 1.5 MW bamboo-based blade

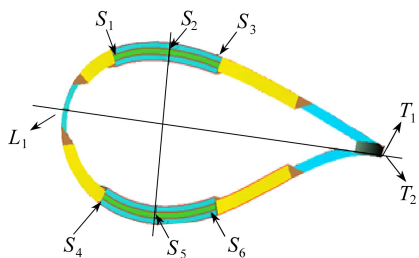


图9 竹叶片截面选取的疲劳危险点

Fig.9 Selected dangerous points on the blade section

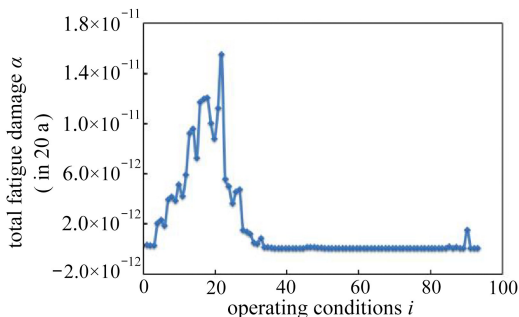


图10 危险点的疲劳损伤容限

Fig.10 Fatigue damage tolerance at the dangerous points

图9是竹叶片危险截面的疲劳危险点的选取。按照 DNV 的规范要求, 叶片所有节点都有可能是疲劳危险点, 都需要进行疲劳校核; 而 GL 2010 中给出了疲劳校核危险点选取的简化形式, 即选择叶片前缘、尾缘和主梁最高点为疲劳危险点。本设计中, 选择叶片展向铺层变化截面, 各截面取 9 个危险点, 分别为前缘点、吸力面 (S) 和压力面 (P) 的竹材与芯材搭接位置及

竹材铺放最高点、尾缘点,计算近 300 个疲劳工况下各危险点的疲劳损伤,图 10 给出最危险点各工况的疲劳损伤,损伤因子  $\alpha$  小于 1,满足复合材料疲劳校核要求。

## 4 总结和展望

本文从大型风力机竹叶片设计的材料及结构角度出发,首先简要介绍作为叶片主增加材料的竹层积材的力学特性,随后基于这些材料数据,给出常规的 1.5 MW 竹叶片的气动和结构设计方法,并重点阐述了竹叶片的结构铺层方法和关键技术细节.竹叶片的优势主要体现在产品性价比高、节能环保和可回收再利用等方面,但竹叶片有其自身的技术难点.与传统玻璃钢制造技术相比,竹材虽比刚度高,但其比强度较低,疲劳性能相对较差,还存在斜接导致的性能下降等问题,这些技术难点制约着竹层积材在风力机叶片设计中的大范围应用.要解决这些问题,目前的研究工作主要应从两个方面开展:1) 竹材物理力学性能离散度很大,与玻纤相比,其在各种环境和条件下的基本物理属性和力学性能仍然需要开展更深入和广泛的研究;2) 研究竹层积材与风力机常用的各种树脂、胶黏剂和玻璃纤维等材料联合使用的综合性能特性,进行竹层积材的改进以及与其他材料联合构成性能更优秀的复合材料,应成为竹质材料在叶片设计应用中的突破重点。

### 参考文献(References):

- [1] Goren A, Atas C. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding[J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2008, **34**(2): 117-120.
- [2] Aly-Hassan M S, Hatta H, Wakayama S, Watanabe M, Miyagawa K. Comparison of 2D and 3D carbon/carbon composites with respect to damage and fracture resistance[J]. *Carbon*, 2003, **41**(5): 1069-1078.
- [3] 王珑, 王同光, 罗源. 改进的 NSGA-II 算法研究风力机叶片多目标优化[J]. *应用数学和力学*, 2011, **32**(6): 693-701. (WANG Long, WANG Tong-guang, LUO Yuan. Improved non-dominated sorting genetic algorithm NSGA-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(6): 693-701. (in Chinese))
- [4] WANG Tong-guang, WANG Long, ZHONG Wei, XU Bo-feng, CHEN Li. Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis[J]. *Chin Sci Bull*, 2012, **57**(5): 466-472.
- [5] Park J, Kim J, Shin Y, Lee J, Park J. 3 MW class offshore wind turbine development[J]. *Current Applied Physics*, 2010, **10**(2): 307-310.
- [6] Griffin D A, Zuteck M D. Scaling of composite wind turbine blades for rotors of 80 to 120 meter diameter[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2001, **123**(4): 310-319.
- [7] Bossanyi E A. Wind turbine control for load reduction[J]. *Wind Energy*, 2003, **6**(2): 229-244.
- [8] Deb K, Agrawal S, Pratab A, Meyarivan T. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective; NSGA-II[J]. *Evolutionary Computation*, 2002, **6**(2): 182-197.
- [9] Lindenburg C. *Aeroelastic Analysis of the LMH64-5 Blade Concept*[M]. New York: Addison-Wesley, 2003.

# Application of Bamboo-Based Laminates in the Design of Large-Scale Wind Turbine Blades

WANG Long<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, WANG Tong-guang<sup>1</sup>

- (1. *Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China;*  
2. *Wuxi Wind Power Institute Ltd Co, Wuxi, Jiangsu 214174, P.R.China*)

**Abstract:** From the viewpoint of material and structure in the design of large-scale wind turbine bamboo-based blades, a series of mechanical property tests and basic characteristics of bamboo-based laminates as the major enhancement materials for blade spars were briefly introduced. Based on these material performance data, the aerodynamic and structural design of a 1.5 MW wind turbine bamboo-based blade in conventional form was carried out. Then, the process of the blade structure-overlay was documented in some detail especially. For completeness, some technical issues existing in the design of bamboo-based blade were discussed.

**Key words:** bamboo-based blade; bamboo-based laminates; material property experiment

**Foundation item:** The National Basic Research Program of China ( 973 Program )  
(2014CB046200)