

碳/玻混杂纤维铺层结构对风力机叶片弯扭耦合特性的影响

付凌峰 姜鑫 孙震 温世东 高铭泽 田瑞

Influence of carbon/glass hybrid fiber layup structure on the bending-twisting coupling behavior of wind turbine blades

FU Lingfeng, JIANG Xin, SUN Zhen, WEN Shidong, GAO Mingze, TIAN Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220915.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对称非均匀层合板梁的弯扭耦合效应

Bend-twist coupling effect of symmetric un-uniform laminate plate beam

复合材料学报. 2017, 34(7): 1462–1468 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170121.001>

GFRP风电叶片段结构强度三维有限元分析

Three-dimensional finite element analysis of the structural strength of GFRP wind turbine blade segment

复合材料学报. 2019, 36(8): 1864–1872 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181217.001>

混杂比对单向碳-玻层间混编复合材料0° 压缩和弯曲性能的影响

Effects of hybrid ratio on the axial compressed and flexural properties of unidirectional inter-layer carbon-glass hybrid composites

复合材料学报. 2017, 34(4): 758–765 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160630.003>

真空辅助树脂灌注法制备风电叶片树脂的渗透及缺陷

Resin penetration and defects of wind turbine blades prepared by vacuum assisted resin infusion method

复合材料学报. 2019, 36(12): 2779–2785 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.001>

碳纤维增强聚合物复合材料车身T型接头静态性能与失效机制

Performance and failure mechanics of carbon fiber reinforced polymer composite T-joint in quasi-static loading for automobile structures

复合材料学报. 2019, 36(10): 2227–2234 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181114.001>

碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂复合材料低速冲击性能及其模拟

Low-velocity impact behavior and numerical simulation of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites

复合材料学报. 2021, 38(1): 165–176 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200922.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220915.006

碳/玻混杂纤维铺层结构对风力机叶片
弯扭耦合特性的影响



分享本文

付凌峰¹, 姜鑫^{*1}, 孙震³, 温世东¹, 高铭泽¹, 田瑞^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051; 3. 国能准能集团有限责任公司, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为研究复合材料铺层结构对叶片弯扭耦合特性的影响。以功率 2 kW 的风力机叶片试样为研究对象, 选用碳/玻纤维不同混杂比 (4 : 4 和 2 : 6) 双轴向经编织物。基于经典层合板理论及联合节点位移法, 实验研究集中载荷作用下, 铺层结构叶片试样形变特性, 分析叶片试样弯扭耦合特性。结果表明: 同种碳/玻纤维混杂时, 纤维排列角度为 25°时, 叶片试样等效弯扭耦合系数最佳为 0.186, 而同种纤维排列角度, 碳/玻纤维混杂比 4 : 4 的叶片试样等效弯扭耦合系数大于碳/玻纤维混杂比 2 : 6 的叶片试样。应变测试实验发现沿叶片试样展向, 叶片试样主应变逐渐减小, 弯扭耦合特性可有效改善叶根处主应变。

关键词: 碳/玻混杂; 风力机叶片; 弯扭耦合; 应变特性; 节点位移法

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)07-3912-09

Influence of carbon/glass hybrid fiber layup structure on the bending-twisting coupling behavior of wind turbine blades

FU Lingfeng¹, JIANG Xin^{*1}, SUN Zhen³, WEN Shidong¹, GAO Mingze¹, TIAN Rui^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Laboratory of Wind and Solar Energy Utilization Technology, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Guoneng Zhunneng Group CO., LTD., Erdos 017000, China)

Abstract: In order to analyze the influence of layer structure of composite material on bending-twisting coupling behavior of wind turbine blade, the carbon/glass biaxial warp knitting fabric with hybrid layer ratio 4 : 4 and 2 : 6 were selected as reinforcement to fabricate blade. A 2 kW wind turbine blade samples model was established and the strain deform behavior of blade samples was experimental studied by combining classical laminate theory and nodal displacement method. The bending-twisting coupling behavior was also analyzed. The results show that when the carbon/glass hybrid ratio is same and the fiber off-axis angle is 25°, the optimal value of equivalent bending-twisting coupling coefficient of blade samples is 0.186. With same fiber off-axis angle, carbon/glass hybrid ratio 4 : 4 blade samples has higher equivalent bending-twisting coupling coefficient than carbon/glass hybrid ratio 2 : 6 blade samples. The strain measurement experiment shows that the principal strains decreases gradually along with blade length, and bending-twisting coupling behavior have a good effect on perfecting the principal strain at the blade root.

Keywords: carbon/glass hybrid; wind turbine blades; bending-twisting coupling; strain behavior; nodal displacement method

收稿日期: 2022-07-14; 修回日期: 2022-08-20; 录用日期: 2022-09-03; 网络首发时间: 2022-09-16 09:23:25

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220915.006>

基金项目: 国家自然科学基金 (12272189); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目-重点项目 (NJZZ22395); 内蒙古工业大学科学研究项目-博士基金 (BS2021056)

National Natural Science Foundation of China (12272189); Scientific Research Project of Higher Education Institutions in Inner Mongolia Autonomous Region-Key Project (NJZZ22395); Inner Mongolia University of Technology Scientific Research Project-Doctoral Foundation (BS2021056)

通信作者: 姜鑫, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为风力机叶片结构设计及优化 E-mail: jiangxin@imut.edu.cn

引用格式: 付凌峰, 姜鑫, 孙震, 等. 碳/玻混杂纤维铺层结构对风力机叶片弯扭耦合特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3912-3920.

FU Lingfeng, JIANG Xin, SUN Zhen, et al. Influence of carbon/glass hybrid fiber layup structure on the bending-twisting coupling behavior of wind turbine blades[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3912-3920(in Chinese).

在“双碳”背景下, 风力发电作为新能源发电得到大力支持与发展, 而风力发电仍然面临着成本居高不下的困境, 其中叶片作为风力发电核心部件, 其制造成本与运行寿命是重要影响因素。目前风电叶片主要应用的增强纤维是玻璃纤维和碳纤维。玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)比强度高, 在 320℃ 时可保持 50% 的拉伸强度, 耐化学、耐腐蚀及耐环境的性能较好。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有较高的比强度和比刚度、耐腐蚀、耐疲劳、耐冲击, 能够满足风力机叶片的刚度、强度和疲劳方面的性能。CFRP 成本较高、GFRP 成本相对低廉^[1]。而碳/玻混杂纤维增强树脂基复合材料(HFRP), 可以在改变传统风电叶片复合材料成型工艺基础上, 显著提高叶片的刚度和模量, 同时有效降低原材料的生产成本^[2]。

具有弯扭耦合特性的叶片在承受单向风载荷冲击时, 可以同时发生弯曲、扭转两种方向的变形, 防止叶片单独受弯曲或扭转方向上的单一载荷作用, 进而提高了叶片所承受单方向载荷的极限和运行寿命^[3-4]。对此大量学者对弯扭耦合特性进行深入研究。

周邢银^[5]将叶片简化为悬臂梁, 基于节点位移法, 推出叶片弯曲、扭转变形公式, 并研究了叶片的长度对其弯扭耦合特性的影响; 张龙等^[6]基于复合材料力学中经典层合板理论, 提出刚度权值与载荷系数两个分析参数, 并研究了分析参数在弯扭耦合效应中对叶片结构变形的影响; Zhang 等^[7]对两种不同铺层结构层压板进行柔性四点弯曲试验, 分析发现在层压板上施加弯曲载荷时, 柔性四点弯曲装置对层压板没有限制扭转方向变形; Jing 等^[8]提出一种符号优化算法, 设计了从层合板中间平面到最外层平面的铺层方向符号, 并顺序迭代来设计复合材料层合板, 该方法将无量纲各向异性系数控制到目标值, 进而控制层合板的弯扭耦合效应; Gu 等^[9]提出一种矩形叶片 spar 的概念设计, 利用有限元分析芯材的单元几何形状如何作用叶片的弯曲、扭转特性, 并探讨了扭转、质量位置和转速之间的关系; 刘瑞杰^[10]建立了智能风力机模型, 分析非定常风况下智能叶片的弯扭耦合特性, 发现弯扭耦合在减少叶片振动和输出功率的波动上具有显著效果; Khazar 等^[11]通过研究风力机叶片的铺层不均衡(纤维铺层角度、材料和厚度), 分析结构弯扭耦合对颤振的影响, 发现使用碳纤维可以提高风力

机叶片的颤振性能, 并保证更高的结构弯扭耦合; Stablein 等^[12]将弯扭耦合引入结构叶片截面模型的刚度矩阵中, 进而研究弯扭耦合对附流中二维叶片截面气动弹性模态特性和稳定性极限的影响; Farsadi 等^[13]基于时域分析研究减轻风力涡轮机系统负载的弯扭耦合叶片的颤振特性, 并对其进行超速分析, 发现弯扭耦合特性使叶片的颤振风和转速低于基准叶片。

以上文献主要从事叶片弯扭耦合特性的研究方法、思路及模型建立, 但内容均聚焦于模型准确性与数值分析计算, 缺乏基于弯扭耦合效应产生机制分析叶片弯扭耦合特性。

由于叶片长宽比、长厚比大的特点, 且由吸力面与压力面两部分组成, 因此可将叶片简化为双层层合板悬臂梁的形式研究^[5, 14]。而碳/玻混杂复合材料的压缩模量与拉伸模量主要受混杂比的影响, 随碳纤维含量的增加而线性增加, 而碳纤维成本较高, 层间和层内拉伸和压缩比模量随碳纤维含量的提高性价比逐渐降低^[15]。本文基于经济性与铺层对称性原则, 以碳/玻纤维体积比为 4 : 4 与 2 : 6 的 2 kW 风力机叶片试样为研究对象, 从材料耦合角度单独分析研究叶片试样危险截面的弯扭耦合特性, 并联合节点位移法, 从结构耦合角度分析研究叶片试样整体的弯扭耦合特性。

1 弯扭耦合特性表征

1.1 本构方程

基于经典层合理论, 弯扭耦合关系可以表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} EI & -g \\ -g & GJ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_b \\ M_t \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中: E 为轴向弹性拉伸模量; EI 为横截面挥舞弯曲刚度; GJ 为横截面扭转刚度; k_x 为层合板弯曲率; k_{xy} 为层合板扭曲率; M_x 为层合板单位宽度弯矩; M_{xy} 为层合板单位宽度扭矩; M_b 为层合板弯矩; $M_b=bM_x$; M_t 为层合板扭矩; $M_t=bM_{xy}$; b 为层合板宽度。弯扭耦合项由 g 表示为

$$g = \alpha \sqrt{EIGJ}, \quad -1 < \alpha < 1 \tag{2}$$

为保证系统正定:

$$\begin{Bmatrix} k_x \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\alpha^2} \begin{bmatrix} EI & \frac{\alpha^2}{g} \\ \frac{\alpha^2}{g} & GJ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_b \\ M_t \end{Bmatrix} \tag{3}$$

则耦合系数 α 的定义为

$$\alpha = \frac{g}{\sqrt{EIGJ}} \tag{4}$$

对于层合板，可表达为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_{xy} \\ k_x \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{A}_{16} & \bar{A}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{D}_{11} & \bar{D}_{16} \\ 0 & 0 & \bar{D}_{16} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

其中： ε_x 为层合板x方向应变； ε_{xy} 为层合板扭转方向应变； $\bar{A}_{ij}$ 为层合板面内柔度； $\bar{D}_{ij}$ 为层合板弯曲柔度； N_x 为层合板x方向单位内力； N_{xy} 为层合板单位剪切力。

$$\begin{cases} \bar{D}_{11} = \frac{EI}{b} \\ \bar{D}_{66} = \frac{GJ}{b} \\ \bar{D}_{16} = -\frac{g}{b} \end{cases} \tag{6}$$

则耦合系数可以改写为

$$\alpha = -\frac{\bar{D}_{16}}{\sqrt{\bar{D}_{11}\bar{D}_{66}}} \tag{7}$$

且根据经典层合板理论可以推出：

$$\theta = -\int_0^x (\bar{D}_{11}M_x + \bar{D}_{16}M_{xy})dx \tag{8}$$

$$\varphi = -\frac{1}{2}\int_0^x (\bar{D}_{16}M_x + \bar{D}_{66}M_{xy})dx \tag{9}$$

其中： φ 为节点扭转角； θ 为节点弯曲角。由上述推导过程可知，截面刚度法所得耦合系数 α 为层合板截面特性，与叶素理论的假设类似，各个截面在叶片展向方向无相互干扰作用，为贴近实际，在此基础上还需联合节点位移法，将叶片长度对弯扭耦合特性的影响考虑进去。

1.2 节点位移法

若将叶片沿展向分为n个节点，则可定义叶片各节点弯扭耦合系数为^[17]

$$\zeta = \frac{\varphi}{\theta} \tag{10}$$

式中， ζ 为节点弯扭耦合系数。

各节点的弯曲角和扭转角均不相同，则各节点弯扭耦合系数不同，由此可定义弯扭耦合向量： $\Delta = (\zeta_1 \ \zeta_2 \ \zeta_3 \ \dots \ \zeta_i \ \dots \ \zeta_n)^T$ (11)

式中， ζ_i 为第i个节点的弯扭耦合系数。

两相邻节点间距离为叶片等效为悬臂梁后梁单元长度，对 Δ 中各系数进行加权平均，定义叶

片整体等效弯扭耦合系数：

$$\zeta^* = \frac{2}{L^2} \sum_{i=1}^n \zeta_i h_i \tag{12}$$

式中： ζ^* 为等效弯扭耦合系数； L 为叶片总长； h_i 为节点i的加权系数。

加权系数 h_i 的表达式为

$$h_i = L_i g_i \tag{13}$$

式中： L_i 为第i个梁单元长度； g_i 为第i个梁单元的中点到叶片固定端的距离。

2 碳/玻混杂叶片试样制备及力学性能

2.1 碳/玻混杂叶片试样材料制备

选用碳/玻璃纤维体积比为4：4和2：6的双轴向经编织物为增强体。双轴向经编织物由经纱、纬纱和沿厚度方向的捆绑纱组合而成，该结构主要沿纤维轴向承力，结构示意图如图1所示。

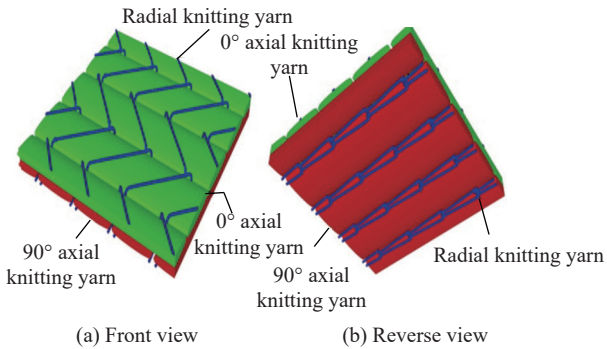


图1 双轴向经编织物结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of biaxial warp-knitted fabric

采用真空辅助树脂传递模塑成型工艺制备试样^[18]。操作流程：丙酮擦拭模具，并涂抹脱模蜡，铺放好脱模布，将纤维布按顺序铺好，裁剪周边外露纤维丝束，在上面铺设导流网，粘接导流管，密封真空袋，抽真空，并进行真空保压测试，使真空度不高于0.03 MPa，将环氧树脂与固化剂的混合物（二者质量比10：3）利用真空负压将之导入真空袋，使其完全浸润纤维，具体成型系统如图2。

完成上述流程，对模具进行加热，固化板材，便可将所制复合材料单层板从模具上取下。

2.2 碳/玻混杂材料力学性能

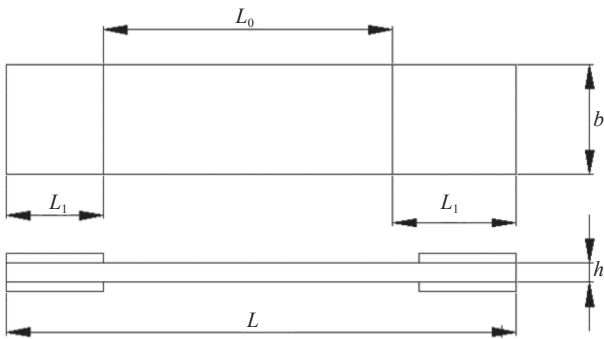
按照ISO 527-5:2009^[19]测试标准将所制备的两种复合材料裁剪成规定尺寸试样备用，试样两端粘结加强片。每种试样90°、±45°与0°各制备5个。试样示意如图3所示。

试样尺寸要求如表1所示。



图2 碳/玻混杂叶片试样的成型系统

Fig. 2 Vacuum system of carbon/glass hybrid blades samples



L —Total length of composite material samples; L_0 —Test length of composite material sample; L_1 —Length of reinforcing piece of composite material sample; b —Width of composite material sample; h —Thickness of composite material sample

图3 碳/玻混杂材料试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of carbon/glass hybrid material samples

测试设备为济南如通测试技术有限公司 WDW-100 kN 万能材料试验机。试样装夹时与地面完全垂直，应变片连接到上海精密仪器仪表有限公司 WS-3811 数字式应变仪上，夹头移动速率为 2 mm/min。

表2 碳/玻混杂叶片试样性能

Table 2 Properties of carbon/glass hybrid blade samples

Carbon/glass hybrid ratio	Test direction/(°)	Density/(g·cm ⁻³)	E /GPa	G /GPa	ν
4 : 4	0	1.73	8.15	3.17	0.284
	90		7.56	2.94	
2 : 6	0	1.77	5.15	2.02	0.275
	90		4.64	1.82	

Notes: E —Modulus of elasticity; G —Shear modulus; ν —Poisson's ratio.

3 碳/玻混杂叶片试样弯扭耦合特性实验

制备碳/玻纤维不同混杂比的 0°试样，并沿偏轴切割，尺寸长 0.7 m×宽 0.12 m，以 0°纤维角度

图 4 为准静态拉伸实验图。

试样破坏的位置要求位于测试段内，将试验数据导出并进行处理，可得到叶片试样增强体力学性能。表 2 为试验测得的复合材料力学性能。

表 1 碳/玻混杂叶片材料试样尺寸

Table 1 Samples size of carbon/glass hybrid blade material

Title	Size/mm
Length L	250
Width b	25
Thickness h	2-3
Test section L_0	150
Strengthening section L_1	50



图4 准静态拉伸实验图

Fig. 4 Quasi-static tensile diagram

为基准，切割的 6 种角度分别为 0°、15°、25°、35°、45°、55°，单层板制作两份，为了测试结果精确上述每种试样各制备 5 个。其中 0°纤维轴向

单层板不具有弯扭耦合特性^[20-21]，主要用于在弯扭耦合应变测试实验中比较。

将叶片简化为对称铺层的双层层合板^[14]。将所制单层板粘贴成双层层合板，以纤维排列角度 15°、25°、35°叶片试样为例，以层合板中面为对称面，进行对称粘结得到，如图 5 所示，其他叶片试样依此方法制作。

对所制得叶片试样依据碳/玻纤维混杂比例及纤维排列角度进行编号，碳/玻纤维混杂比 4 : 4 的叶片试样标记为 A，碳/玻纤维混杂比 2 : 6 的叶片试样标记为 B，纤维排列角度 15°、25°、35°、45°、55°按角度值记作 15、25、35、45、55。以 A25 为例，含义为碳/玻纤维混杂比 4 : 4，排列角度 25°的叶片，叶片试样编号及含义如表 3 所示。

将叶片试样根部固定于万能试验机，叶尖悬挂 1 kg 砝码，形成悬臂梁的结构。由于需夹持一部分叶片试样，则叶片试样有效几何尺寸大小应



(a) Carbon/glass fiber hybrid ratio 4:4



(b) Carbon/glass fiber hybrid ratio 2:6

图 5 部分叶片试样

Fig. 5 Diagram of part carbon/glass hybrid blades samples

表 3 碳/玻混杂叶片试样编号及含义

Table 3 Carbon/glass hybrid blade samples number and meaning

Number	Implication
A0	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 0°
A15	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 15°
A25	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 25°
A35	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 35°
A45	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 45°
A55	Ratio (carbon/glass) 4 : 4, angle 55°
B0	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 0°
B15	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 15°
B25	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 25°
B35	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 35°
B45	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 45°
B55	Ratio (carbon/glass) 2 : 6, angle 55°

为：长 0.6 m×宽 0.12 m。

叶片沿展向长度为 R ，以叶根截面开始，每 6 cm 为一个间隔分布一个测量面，测量面用于挠度测量，且是粘贴应变片的位置，按顺序将各测量面标记为 1-1、2-2、3-3...10-10，对应叶片试样位置示意图如图 6 所示。处理挠度数据，选出两种碳/玻纤维混杂比叶片试样中弯扭耦合特性最好的叶片试样进行应变测试实验，并与之对应纤维排列角度为 0°的叶片试样进行对比。

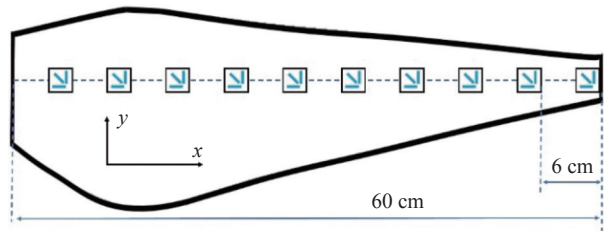


图 6 碳/玻混杂叶片测量面示意图

Fig. 6 Schematic of measure plane for carbon/glass hybrid blades

在需要进行弯扭耦合应变测量实验的叶片试样上，在其各个测量面上粘贴上型号为上海澄测电子科技有限公司 120-3 CA 的三轴向应变片作为应变传感器部分，同时为了消除环境温度对测量结果的影响，还需要选用与叶片试样相同的材料制作温度补偿块，将相同型号的三轴向应变片粘贴到与叶片试样相同的材料上，使其与叶片试样处于相同的温度环境中并且不受外力的作用，且将所有应变片连接到上海精密仪器仪表有限公司应变记录设备 TS3860 型静态电阻应变仪，并于自由端悬挂 1 kg 的砝码作为对叶片试样加载的集中载荷，实验如图 7 所示。



图 7 碳/玻混杂叶片试样弯扭耦合实验

Fig. 7 Bending-twisting coupling test of carbon/glass hybrid blades

4 碳/玻混杂叶片试样弯扭耦合效应计算

将百分表固定在万能试验仪台架上，测量各个截面挠度，剔除异样数据，取实验数据平均值作为实验结果。可得各叶片试样被测截面的扭曲角，将所得各叶片试样扭曲角进行曲线拟合，可得到叶片试样沿展向扭曲角的变化，如图 8 所示。

可知，叶片试样扭曲角均在相对截面位置 0.7R~0.8R 处达峰值，此处，碳/玻纤维混杂比 4 : 4 叶片试样最大扭曲角与最小扭曲角相差约 32.9%，碳/玻纤维混杂比 2 : 6 叶片试样相差约为 73.8%。结合 A 叶片试样、B 叶片试样可知，同种纤维排列角度下，碳/玻纤维混杂比 4 : 4 叶片试样比 2 : 6 叶片试样在各截面产生的扭曲角更大，且二者均于纤维排列角度为 25° 时，产生最大扭曲角，在峰值处二者差为 19.4%，由式 (10) 可知，该角度更利于产生弯扭耦合效应。

叶片试样弯曲角的计算公式为^[22]

$$\theta = \frac{dw}{dz} \tag{14}$$

其中： z 为以叶片根部为原点的展向坐标； w 为叶片试样截面的中点挠度。

由式 (14) 可知，对所测挠度曲线进行一阶求导，可求得叶片试样弯曲角沿展向的变化，见图 9。可知，叶片试样弯曲角在截面位置 0.7R~0.8R 最大，碳/玻纤维混杂比 4 : 4 叶片试样最大弯曲角与最小弯曲角相差约 3.1%，碳/玻纤维混杂比 2 : 6 叶片相差约为 8.3%，由此可知纤维排列角度发生变化导致弯曲角变化程度远小于扭曲角变化程度。

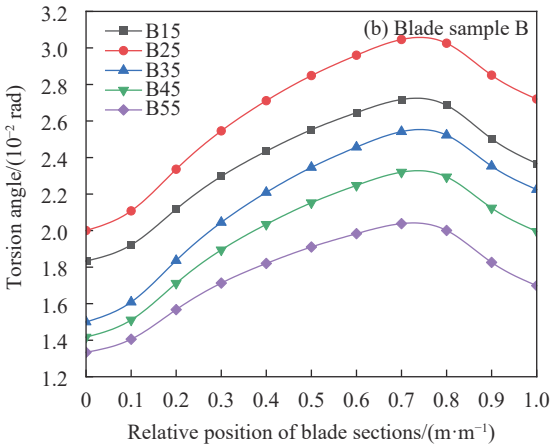
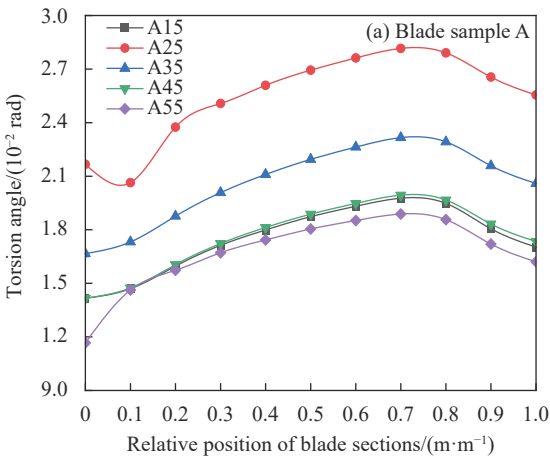


图 8 碳/玻混杂叶片试样各截面扭曲角

Fig. 8 Torsion angle of carbon/glass hybrid blades each section

结合节点位移法可知，扭曲角相比较弯曲角更容易影响弯扭耦合特性。

根据式 (13) 可计算出所制叶片试样各测量截面的加权系数，加权系数只与叶片试样的几何形状有关，本文实验所制备的叶片试样可共用一套加权系数，见表 4。

将所测得弯曲角、扭转角分别代入式 (8)、式 (9) 可计算出各向柔度系数，联立式 (7) 可计算出叶片试样各截面弯扭耦合系数，将各节点加权系数及其他已知条件代入到式 (12) 中，可计算得出各叶片试样的等效弯扭耦合系数，见表 5。

可知，同种纤维排列角度，A 叶片试样弯扭耦合特性优于 B 叶片试样，A25 叶片在碳/玻纤维混杂比 4 : 4 的叶片试样中弯扭耦合特性最好，B25 叶片在碳/玻纤维混杂比 2 : 6 的叶片试样中的弯扭耦合特性最好，二者等效弯扭耦合系数相差约 19.3%，选择 A25、B25 叶片试样并与之对应纤维排列角度为 0° 的叶片试样进行应变测试对比实

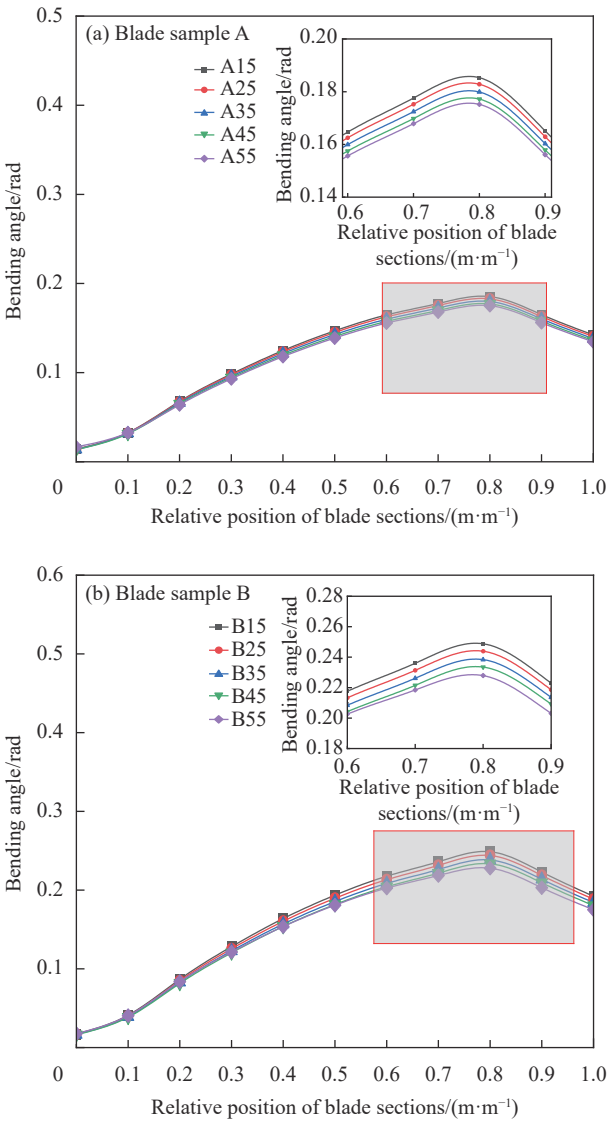


图9 碳/玻混杂叶片试样各截面弯曲角

Fig. 9 Bending angle at each section of carbon-glass hybrid blades

验，对测量所得数据进行处理，得到叶片试样的各测量截面的主应变，如图10所示。

在距离叶片试样固定端的相对截面位置

表4 碳/玻混杂叶片试样各截面加权系数
Table 4 Weighting factors for measured cross sections of carbon/glass hybrid blades samples

Measurement cross-section	Weighting factor
1-1	0.0018
2-2	0.0054
3-3	0.0090
4-4	0.0126
5-5	0.0162
6-6	0.0198
7-7	0.0234
8-8	0.0270
9-9	0.0306
10-10	0.0342

表5 碳/玻混杂叶片试样的等效弯扭耦合系数
Table 5 Equivalent bend-twist coupling coefficient of carbon/glass hybrid blades samples

Blade	Coefficient
A15	0.133
A25	0.186
A35	0.154
A45	0.133
A55	0.128
B15	0.130
B25	0.150
B35	0.117
B45	0.053
B55	0.104

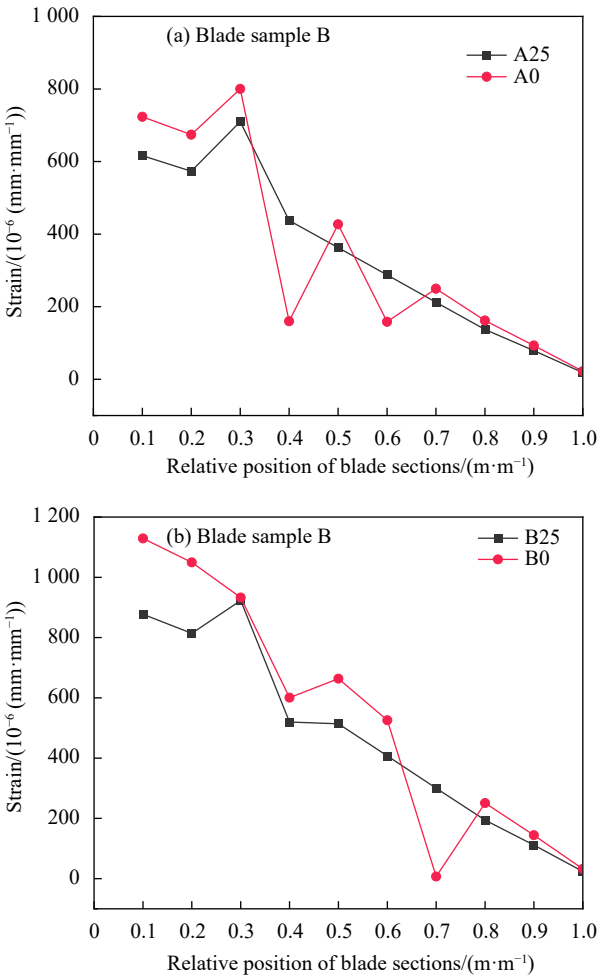


图10 碳/玻混杂叶片试样各截面主应变

Fig. 10 Principal strain of each section of carbon/glass hybrid blades

0.1R处，A25与A0的主应变相差 $102\times 10^{-6}\text{mm/mm}$ ，约为14.3%，B25与B0的主应变相差约 $236\times 10^{-6}\text{mm/mm}$ ，约为20.5%，在接近固定端的相对截面位置0.2R处，A25与A0的主应变相差 $91\times 10^{-6}\text{mm/mm}$ ，约为12.5%，B25与B0的主应

变相差 215×10^{-6} mm/mm, 约为 18.7%。碳/玻纤维混杂比 4 : 4 叶片试样主应变总体小于 2 : 6 叶片, 在叶根处 A0 与 B0 主应变相差约 31%, A25 与 B25 主应变相差约 34.1%。

其中, 碳玻混杂比 4 : 4 的叶片试样应变图中, 相对截面位置 0.4R 与 0.6R 处纤维偏轴角度为 0° 的叶片试样应变明显较低, 是由于此处位置粘贴应变片时, 胶水没有很好地浸润应变片。对于碳/玻混杂比为 2 : 6 的叶片试样应变图中, 相对截面位置 0.7R 处纤维偏轴角度为 0° 的叶片试样应变为 0, 是由于应变片连接应变测量仪的导线出现故障。

具有弯扭耦合特性的叶片试样应变小于无弯扭耦合特性的叶片试样, 二者的主应变差距从叶根开始沿展向逐渐减小, 到叶尖处二者产生的应变几乎一致。

5 结论

以双轴向经编结构织物为增强体, 选用不同碳/玻混杂比织物为增强体, 以环氧树脂为基体制备了 2 kW 风力机叶片试样。基于经典层合板理论, 并结合节点位移法, 分析了 2 kW NACA4415 叶片的弯扭耦合特性。讨论了碳/玻纤维混杂比 4 : 4 与 2 : 6 这两种蒙皮材料纤维取向角度对叶片试样弯扭耦合特性的影响, 得到如下结论:

(1) 同种铺层材料在给定集中载荷下, 纤维排列角度并不会明显改变叶片试样各个截面弯曲角, 但对扭曲角的影响较明显, 因此弯扭耦合系数主要取决于叶片试样各截面扭转角;

(2) 纤维排列角度为 25° 时, 叶片试样等效弯扭耦合系数最高, A25 叶片试样 (A25 为碳/玻纤维混杂比 4 : 4, 排列角度 25° 的叶片) 为 0.186, B25 叶片试样 (B25 为碳/玻纤维混杂比 2 : 6, 排列角度 25° 的叶片) 为 0.150。表明碳/玻纤维混杂比 4 : 4 的叶片试样整体弯扭耦合特性要优于 2 : 6 的叶片;

(3) 由应变测试实验可知, 弯扭耦合特性可有效改善叶根处的应变特性, 在相对截面位置 0.1R 处, A25 相对 A0 叶片试样改善约 14.3%, B25 相对 A0 叶片试样改善约 20.5%, 但沿叶片展向, 改善效果逐渐减弱。

参考文献:

[1] 王同光. 风力机叶片结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 12-22.

WANG Tongguang. Wind turbine blade structure design[M]. Beijing: Science Press, 2015: 12-22(in Chinese).

[2] 邓富泉, 张丽, 刘少祯, 等. 单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1857-1863.

DENG Fuquan, ZHANG Li, LIU Shaozhen, et al. Mechanical properties of unidirectional continuous carbon fiber-glass fiber interlayer hybrid reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(7): 1857-1863(in Chinese).

[3] CHEN J G, SHEN X, ZHU X C, et al. Study on composite bend-twist coupled wind turbine blade for passive load mitigation[J]. Composite Structures, 2019, 213: 173-189.

[4] PRAVEEN S, MOHAMMED R S, DIPAK K M. A parametric study of flutter behavior of a composite wind turbine blade with bend-twist coupling[J]. Composite Structures, 2019, 207: 764-775.

[5] 周邢银. 大型风力机复合材料叶片弯扭耦合特性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.

ZHOU Xingyin. Study on the bending and twisting coupling characteristics of large wind turbine composite blades[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016(in Chinese).

[6] 张龙, 贾晋荣, 王波, 等. 考虑弯扭耦合效应的复合材料叶片铺层优化方法[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1093-1101.

ZHANG Long, JIA Purong, WANG Bo, et al. Optimization method of composite blade layup considering bending-torsion coupling effect[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1093-1101(in Chinese).

[7] ZHANG Z, WU J, LIANG B, et al. Investigation to the torsion generation of spatial tubes in bending-twisting process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3/4): 1191-1203.

[8] JING Z, CHEN J. An investigation on design of signs in composite laminates to control bending-twisting coupling effects using sign optimization algorithm[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(5): 2131-2156.

[9] GU H, SHAW A D, AMOOZGAR M, et al. Twist morphing of a composite rotor blade using a novel metamaterial[J]. Composite Structures, 2020, 254: 112855.

[10] 刘瑞杰. 智能风力机的气弹特性仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.

LIU Ruijie. Simulation study of air-elastic characteristics of intelligent wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019(in Chinese).

[11] KHAZAR H, ALVARO G M L, CARLOS D M, et al. Flutter performance of bend-twist coupled large-scale wind turbine blades[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016,

- 370: 149-162.
- [12] STABLEIN A R, HANSEN M H, PIRRUNG G. Fundamental aeroelastic properties of a bend-twist coupled blade section[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2017, 68: 72-89.
- [13] FARSADI T, KAYRAN A. Flutter study of flapwise bend-twist coupled composite wind turbine blades[J]. *Wind and Structures An International Journal*, 2021, 32(3): 267-281.
- [14] 周邢银, 安利强, 王璋奇. 对称非匀层合板梁的弯扭耦合效应[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(7): 1462-1468.
ZHOU Xingyin, AN Liqiang, WANG Zhangqi. Bend-twist coupling effect of symmetric un-uniform laminate plate beam[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(7): 1462-1468(in Chinese).
- [15] 王庆涛. 碳/玻层内混杂单向经编织物渗透性能及混杂复合材料力学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
WANG Qingtao. Study on the permeability properties of unidirectional warp-knitted fabrics blended within carbon/glass layers and the mechanical properties of blended composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2018(in Chinese).
- [16] KIM S H, SHIN H, BANG H J. Bend-twist coupling behavior of 10 MW composite wind blade[J]. *Composites Research*, 2016, 29(6): 369-374.
- [17] 杨庆生. 复合材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 134-158.
YANG Qingsheng. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Science Press, 2020: 134-158(in Chinese).
- [18] 马腾, 李炜. 单向碳/玻璃纤维层内-层间混杂复合材料拉伸破坏模式研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2015, 262(12): 87-93.
MA Teng, LI Wei. Study on tensile damage mode of unidirectional carbon/glass fiber intra-layer-interlayer hybrid composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2015, 262(12): 87-93(in Chinese).
- [19] International Organization for Standardization. Plastics—Determination of tensile properties—Part 5: Test conditions for fibre-reinforced plastic composites: ISO 527-5: 2009[S]. Genève: ISO, 2009-06-26.
- [20] 刘旺玉, 龚佳兴, 刘希凤, 等. 基于弯扭耦合的自适应风力机叶片设计[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(7): 1014-1019.
LIU Wangyu, GONG Jiaying, LIU Xifeng, et al. Adaptive wind turbine blade design based on bending-torsion coupling[J]. *Journal of Solar Energy*, 2011, 32(7): 1014-1019(in Chinese).
- [21] 庞程燕. 水平轴水轮机叶片的弯扭耦合设计及流固耦合计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
PANG Chengyan. Bending-torsional coupling design and fluid-structure coupling calculation of horizontal axis hydraulic turbine blades[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014(in Chinese).
- [22] WIENS M, MEYER T, WENSKE J. Exploiting bend-twist coupling in wind turbine control for load reduction[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2020, 53(2): 12139-12144.