

文章编号:0254-0096(2020)01-0210-07

E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料拉伸与模态特性分析

韩巧丽¹, 李汪灏², 邢为特², 张正², 郭珊珊²

(1. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 对小型风力机叶片铺层结构所用的E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料进行拉伸试验与试验模态分析,对比分析不同种类纤维的拉伸强度、破坏形态与弹性模量等抗拉性能与模态特性,得出以下结论:根据拉伸强度、破坏形态与弹性模量得出单轴向0°层合板的抗拉性能更好;随着层数增加,单轴向0°纤维布对挥舞固有频率的影响最大,双轴向±45°纤维布对扭转固有频率的影响最大;层数与铺设角度对一阶挥舞、扭转振型影响较小;小型风力机风轮的转速较高,可铺设更多的单轴向0°纤维布,以改变其模态特性;为初步探究单层、多层板模态参数间的关联性,分析得出铺层顺序的变化对层合板固有频率的影响最大值为1.45 Hz,并为E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料钢叶片的生产与研究提供基础理论依据。

关键词: 复合材料; 模态分析; 抗拉性能; 小型风力机; 叶片铺层

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引言

对于风力机的主要受力构件叶片而言,复杂多变的工作环境会使叶片铺层结构造成损伤,因此对风力机叶片进行结构动力学研究对于风力机的安全性起到至关重要的作用^[1]。现今对于叶片铺层结构的研究主要以大型风力机叶片 E-玻璃纤维/环氧树脂复合材料为主,探究铺层结构对叶片性能的影响^[2-7]。风电场因其可提高能源利用率以及改善环境等优点拥有良好的发展前景,但随着场地资源的减少,风场的建设逐渐趋于饱和,因此离散型能源的利用逐渐引起人们重视,因而小型风力机的发展速度逐渐加快。与大型风力机风轮相比,小型风力机风轮转速与工况环境的差异较大,两者研究成果的互通性存在不足,所以为提高小型风力机的安全性、降低制造成本,需对主要受力部件叶片进行研究。

小型风力机叶片形式以空心薄壁玻璃钢结构为主,铺层结构为玻璃纤维/树脂复合材料,结构性能稳定且具有可设计性^[8-10]。随着技术的进步,传统的环氧树脂将被性价比更高的新型材料乙烯基酯树脂逐步取代^[11-12]。E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂具有更短的成型

周期与更低的成本,使其愈加适合数量多、工期短的小型风力机叶片,但 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料在小型风力机叶片结构性能上的研究相对较少^[13]。为了使小型风力机叶片结构性能得到提升、制造成本得到降低,从叶片结构性能的角度完善复合材料的基础材料特性是十分必要的。因此,通过以 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料为研究对象,对其进行拉伸试验与试验模态分析,确定材料的抗拉性能与模态特性,为 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂玻璃钢叶片的生产与研究提供基础理论依据。

1 理论基础

1.1 复合材料静力学理论

复合材料层合板由多层单层板组合而成。为了得到层合板的结构特性,必须清楚各单层的特性。层合板受力后,除产生单层板面内应力外,还会产生面外应力。根据式(1)所示的蔡-吴(Tsai-Wu)应力准则^[14]:

$$F_1 I = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_1} - \frac{1}{X_c} \quad (2)$$

收稿日期: 2018-11-15

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0515)

通信作者: 韩巧丽(1976—), 女, 博士、副教授, 主要从事风力发电技术方面研究。nmgtynxh@hotmail.com

$$F_2 = \frac{1}{Y_1} - \frac{1}{Y_c} \quad (3)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_1 X_c} \quad (4)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_1 Y_c} \quad (5)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (6)$$

$$F_{12} = -\frac{F_{12}^*}{\sqrt{X_1 X_c Y_1 Y_c}} \quad (7)$$

式中, X_1 ——纤维方向的拉伸强度; X_c ——纤维方向的压缩强度(绝对值); Y_1 ——横向的拉伸强度; Y_c ——横向的压缩强度(绝对值); S ——面内剪切强度(绝对值); F_{12}^* ——系数,数值范围为 $-1 \sim 1$,一般取为 $-1/2$ 。

当 $F.I. \geq 1$ 时,单层板发生破坏,进而造成层合板的损坏。蔡-吴(Tsai-Wu)应力准则考虑了不同应力及相互作用的影响,此外还需考虑不同破坏形式的描述。而层合板的破坏判定标准有首层破坏准则(FPF)和最终层破坏准则(LPF),破坏形式可分为基体开裂、纤维断裂以及分层破坏^[15]。

1.2 复合材料模态理论

模态分析作为结构动力学的基础,把输入信号和响应信号进行识别,得到结构的模态参数,即固有频率、阻尼比和振型^[16]。试验过程中,试验对象的激励点、响应点之间的脉冲响应函数 h_{ij} 的关系如式(8)所示:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ F_j \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

频响函数 FRF 是所测物体的响应信号和激励信号之比,即 $h_{ij} = \frac{X_i}{F_j}$ 。

$$h(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i \varphi_i^T}{K_{p_i} - \omega^2 M_{p_i} + i\omega C_{p_i}} \quad (9)$$

式中, φ_i ——第 i 个振型向量^[17]; K_p ——经过解耦变换之后的主刚度矩阵; M_p ——经过解耦变换之后的主质量矩阵; C_p ——经过解耦变换之后的主阻尼矩阵。

复合材料层合板的单层厚度会对结构主质量矩阵产生影响,铺层角度、顺序会对主刚度矩阵产生影响,而质量和刚度的变化会影响复合材料层合板模态参数。

2 材料与工艺的选择

复合材料层合板所采用的玻璃纤维根据纤维方向主要分为 3 种,包括 $[0^\circ/90^\circ]$ 双轴向玻璃纤维经编织物

(EBLT1200)、 $\pm 45^\circ$ 双轴向玻璃纤维经编织物(EBX800)、单向 0° 玻璃纤维织物复合毡(EUL400C225)。此 3 种材料在风力机叶片上应用广泛。基体材料为乙烯基酯树脂,固化性能优良、成型周期短、生产效率高。为了方便操作、较快速地成型,并且考虑叶片形状等因素,采用手糊成型工艺进行试件的加工制备。

3 层合板拉伸试验

3.1 试验对象

采用手糊工艺加工制备双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 、双轴向 $\pm 45^\circ$ 、单轴向 0° 纤维布下的 3 层层合板,加工过程中保证纤维方向按计划铺设,并保证纤维完整。树脂充分浸润,保证质量分布均匀,最后加热固化,制成层合板,试件厚度如表 1 所示。

表 1 复合材料层合板厚度

Table 1 Thickness of composite laminates

试件类型	层数	单层厚度/mm
$[0^\circ/90^\circ]$	3	1.00
$\pm 45^\circ$	3	0.80
单向 0°	3	0.80

试验构件的制备依照 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》,试件几何尺寸如图 1 所示。

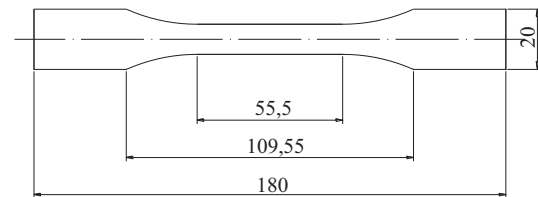


图 1 拉伸试验试件尺寸(mm)

Fig. 1 Specimen size in tensile test(mm)

3.2 试验内容

按照 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》及 GB/T 1446—2005《纤维增强塑料性能试验方法总则》规定,使用 WDW-100J 型微机控制电子万能试验机对层合板进行拉伸试验,如图 2 所示。夹持试件时保证试件的中心线与上、下夹具的对准中心线一致,加载速度设定为 2 mm/min,进行拉伸试验直至试件发生破坏,得到其力学性能参数。

3.3 试验结果分析

对手糊工艺下的双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 、双轴向 $\pm 45^\circ$ 与单轴向 0° E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料进行拉

伸试验。通过试验结果得知,单轴向 0° 层合板的拉伸强度为 212.35 MPa, 双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的拉伸强度为 92.50 MPa, 双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板的拉伸强度为 38.04 MPa, 可看出单轴向 0° 层合板的拉伸强度最高。



图2 拉伸试验
Fig. 2 Tensile test

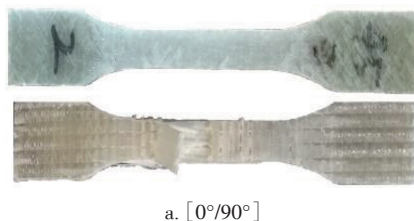
从弹性模量考虑,单轴向 0° 层合板的弹性模量为 8333 MPa, 双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的弹性模量为 8373 MPa, 双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板的弹性模量为 5456 MPa, 可看出单轴向 0° 层合板与双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的弹性模量相近, 抵抗弹性变形的能力大小相同, 并高于双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板, 如表 2 所示。

表2 复合材料拉伸性能参数

Table 2 Tensile properties of composite materials

试件类型	层数	破坏载荷/N	拉伸强度/MPa	弹性模量/MPa
$[0^\circ/90^\circ]$	3	3071	92.50	8373
$\pm 45^\circ$	3	875	38.04	5456
0°	3	4884	212.35	8333

通过对试件的破坏形式进行观察, 可发现单轴向 0° 层合板断裂为树脂与纤维同时断裂, 并且破损位置较为整齐, 而双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板与双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板发生树脂与纤维分层断裂, 综合考虑认为单轴向 0° 层合板的抗拉性能更好。完整试件与破坏后的试件如图 3 所示。



a. $[0^\circ/90^\circ]$

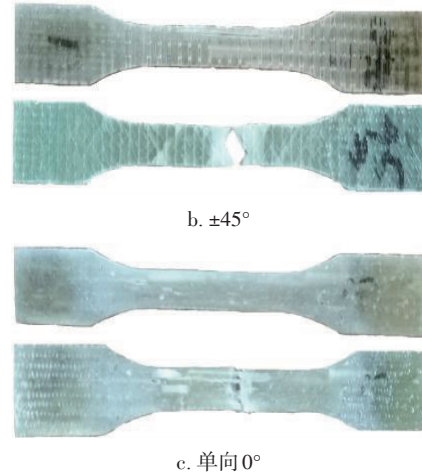


图3 层合板拉伸试验原件与破坏形式

Fig. 3 Original parts and failure modes of laminates in tensile test

小型风力机叶片在运行过程中, 风轮转速较高, 所以叶片受到的离心力载荷较大, 即叶片结构承受较大的拉力。通过比较分析 3 种层合板的试验结果, 为使小型风力机 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂叶片结构更好地承受离心力载荷, 可铺设更多的单轴向 0° 纤维布。

4 层合板试验模态分析

4.1 试验对象

加工尺寸均为长 500 mm, 宽 150 mm, 厚 10 mm 的樟松木板, 通过试验模态分析确定其模态参数, 选取 9 个模态参数差异较小的木板, 作为复合材料层合板的承载物。为确定铺层对模态参数的影响大小, 在选择的木板上铺设双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 、双轴向 $\pm 45^\circ$ 、单轴向 0° 纤维布, 分别为 1 层、2 层、3 层。为了提高铺层对木板模态参数的影响, 玻璃纤维布在木板上采用全部包裹的方式对所选编号的木板进行铺设, 并对铺设后的木板进行重新编号, 如表 3 所示。

为了后续探究单层与多层层合板模态关联性研究, 在单层板模态分析的基础上, 制备相同工艺与尺寸下的层合板, 以传统 300 W 小型风力机叶片铺层顺序 $[\pm 45^\circ/(0^\circ/90^\circ)/(0^\circ/90^\circ)/(0^\circ/90^\circ)/0^\circ/\pm 45^\circ/(0^\circ/90^\circ)]$ 为基础, 制备 5 种改变铺层顺序下的层合板, 并对其进行模态分析, 其铺层顺序如表 4 所示。

4.2 试验内容

采用丹麦 B&K 公司的测试设备, 通过单点响应、多点激励的锤击测试方法, 对木板、木板铺层结构与层合板进行试验模态分析(图 4)。利用 PULSE 软件对加速度

传感器和力传感器的信号进行收集处理,频率分辨率为 1 Hz,采用 3 次平均,数据采集过程中通过相干函数来监视传递函数数据的可靠性。

表3 木板铺层编号

Table 3 Numbering of board layer

纤维布方向	层数	木板序号	木板铺设序号	单层厚度/mm
[0°/90°]	1	1	A1	1.16
	2	2	A2	1.08
	3	3	A3	1.07
±45°	1	4	B1	0.99
	2	5	B2	1.02
	3	6	B3	1.01
单向0°	1	7	C1	1.06
	2	8	C2	1.07
	3	9	C3	1.06

表4 层合板铺层顺序

Table 4 Order of layering of laminates

层合板序号	铺层顺序
1	[±45°/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/0°/±45°/(0°/90°)]
2	[±45°/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/0°/±45°]
3	[(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/±45°/0°/±45°]
4	[±45°/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/0°/(0°/90°)/±45°]
5	[(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/(0°/90°)/0°/±45°/±45°]

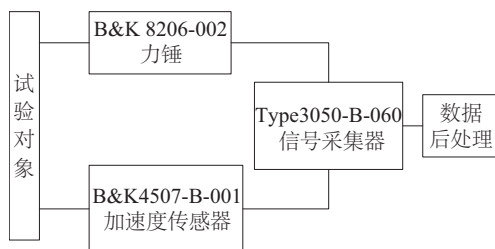


图4 试验模态分析系统框图

Fig. 4 System block diagram of experimental modal analysis

采用台钳作为夹具,在试验过程中保证一端固定,且每个试验对象的固定位置相同,测点布置在试件的外部轮廓上,使其振型可充分表达出试验对象振动状态,且需避免布置在节线上。试件的几何外形及 10 个激励点的分布如图 5 所示。为了充分拾取试件的响应信号,响应点选在试验对象的第 10 号点。

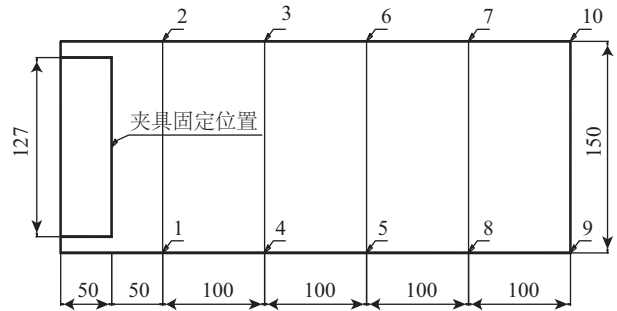


图5 几何外形及测点、夹具位置(mm)

Fig. 5 Geometric shape and measuring points and fixture position(mm)

通过 B&K 公司的 Reflex 对所得信号进行分析处理,其参数估计方法采用 Rational Fraction Polynomial-Z 的方式,其迭代过程通过增加分母多项式的阶次来实现;由于传递函数数量庞大,为了初步判断模态频率所在的频率段,采用 CMIF 对数据量进行缩减,得到清晰的稳态图。使迭代计算结果在稳态图中显示,并自动选择最佳的计算结果,得到木板、木板铺层结构与层合板的模态参数,并通过模态置信准则 AutoMAC 判断试验结果的可靠性。

4.3 试验结果分析

通过对木板与木板铺层结构进行试验模态分析,得到其模态参数,并确定铺层结构造成承载物固有频率的增长大小,结果如表 5 所示。根据固有频率增长率大小,绘制不同类型纤维布随层数变化所造成的固有频率

表5 试件固有频率

Table 5 Natural frequency of specimens

振型	挥舞	扭转	挥舞	扭转	挥舞	扭转
序号	A1		B1		C1	
木板	33	106	33	107	33	106
木板铺层	34	143	33	200	34	140
增长率/%	3.03	34.91	0	86.92	3.03	32.08
序号	A2		B2		C2	
木板	32	106	32	106	32	104
木板铺层	35	166	34	232	37	172
增长率/%	9.38	56.60	6.25	118.87	15.63	65.38
序号	A3		B3		C3	
木板	32	100	32	101	32	104
木板铺层	36	173	37	284	38	172
增长率/%	12.50	73.00	15.63	181.19	18.75	65.38

增长趋势,如图 6 所示。根据固有频率趋势线变化可知,6 组趋势线的 R^2 平均为 0.9253,趋近于 1,故变化可靠。在挥舞方向,单轴向 0° 纤维布的固有频率以 7.86% 的比率增长,相较于双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 纤维布 4.74% 的增长比率和双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布 7.82% 的增长比率而言,单轴向 0° 纤维布对挥舞固有频率的影响最大。在扭转方向,双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布的固有频率以 47.14% 的比率增长,单轴向 0° 纤维布和双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 纤维布的固有频率分别以 16.65% 与 19.05% 的比率增长,故双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布对扭转固有频率的影响最大。

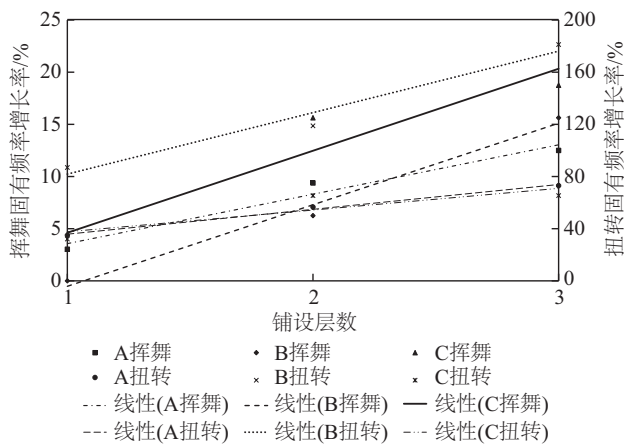


图 6 固有频率增长率变化趋势

Fig. 6 Change trend of natural frequency growth rate

从振型方面考虑,不同的振型可得到振动可能破坏的位置,通过层数与纤维布类型的变化得出其对一阶挥舞、扭转振型影响较小,且节线位置保持不变。以序号为 A1 的木板与木板铺层结构为例,如图 7 所示。小型风力机叶片共振主要是风轮转动频率与一阶挥舞固有频率发生重合所造成的,共振的产生会加速叶片的疲劳,从而使叶片结构产生破坏。为使小型风力机 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂叶片结构最大限度地避

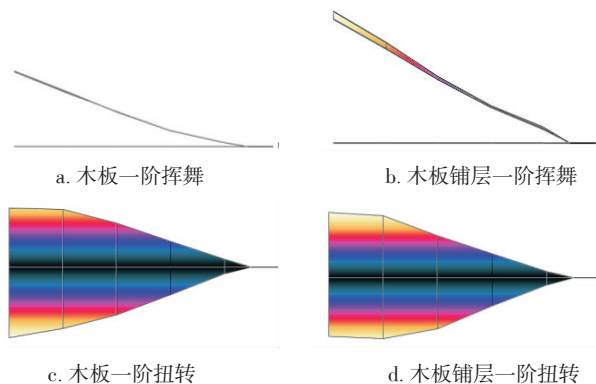


图 7 A1 木板与木板铺层结构振型

Fig. 7 Vibration mode of A1 board and board layer structure

免共振,可提高一阶挥舞固有频率,即更多地铺设单轴向 0° 纤维布。叶片铺层结构更加趋近于层合板,而在 5 种层合板的模态分析中,其一阶挥舞固有频率平均为 16.02 Hz,最大偏差为 1.45 Hz。

5 结 论

对 E-玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料进行拉伸试验与试验模态分析,对比分析不同种类纤维的抗拉性能与模态特性,得出以下主要结论:

1) 单轴向 0° 层合板的拉伸强度高于双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板与双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板,并且单轴向 0° 层合板断裂为树脂与纤维同时断裂,破损位置较为整齐,而双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板与双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板发生树脂与纤维分层断裂。单轴向 0° 层合板与双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 层合板的弹性模量相近,抵抗弹性变形的能力大小相同,并高于双轴向 $\pm 45^\circ$ 层合板。综合考虑单轴向 0° 层合板的抗拉性能更好。后续将针对此 3 种层合板进行强度校核,完善材料参数。

2) 从固有频率方面考虑,随着层数增加,在挥舞方向,单轴向 0° 纤维布的固有频率以 7.86% 的比率增长,高于双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 纤维布和双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布,故单轴向 0° 纤维布对挥舞固有频率的影响最大。在扭转方向,双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布的固有频率以 47.14% 的比率增长,高于单轴向 0° 纤维布和双轴向 $[0^\circ/90^\circ]$ 纤维布,故双轴向 $\pm 45^\circ$ 纤维布对扭转固有频率的影响最大。层合板作为多个单层板组成的复合结构,层合板的质量和刚度受单层板的影响,而铺层顺序变化下的层合板固有频率变化只有 1.45 Hz。但因试验对象数量较小,后续工作中将完善层合板数据以收集更多模态参数,从而探究单、多层板模态参数的关联性。

3) 从振型方面考虑,层数与铺设角度的改变对一阶挥舞、扭转振型影响较小,并且在振动过程中的节线位置保持不变。小型风力机风轮的转速较高,可以铺设更多的单轴向 0° 纤维布,以改变其模态特性。

[参考文献]

- [1] 蔡新. 风力发电机叶片[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
CAI X. Wind turbine blade [M]. Beijing: China Water Power Press, 2014.
- [2] ŁUKASZ DOLIŃSKI, KRAWCZUK M, ŃAK A. Detection of delamination in laminate wind turbine blades using one-dimensional wavelet analysis of modal responses[J]. Shock and vibration, 2018, 2018(6): 1-15.

- [3] 武玉龙, 李春, 高伟. 3 MW 风力机叶片设计建模与模态分析[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(3): 4-7.
WU Y L, LI C, GAO W. Design and modal analysis for 3 MW wind turbine blade [J]. Mechanical research & application, 2013, 26(3): 4-7.
- [4] 陈文朴, 李春, 阳君, 等. 对比分析不同材料及铺层对叶片力学性能的影响 [J]. 能源工程, 2015 (5): 15-19.
CHEN W P, LI C, YANG J, et al. Comparative analysis of different materials and layer on the mechanical behavior of blades [J]. Energy engineering, 2015 (5): 15-19.
- [5] 张春丽. 复合材料风力机叶片结构设计[D]. 上海: 同济大学, 2007.
ZHANG C L. Structure design of composite wind turbine blade[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [6] DOMNICA S M, IOAN C, IONUT T. Structural optimization of composite from wind turbine blades with horizontal axis using finite element analysis [J]. Procedia technology, 2016(22): 726-733.
- [7] HAYAT K, HA S K. Flutter performance of large-scale wind turbine blade with shallow- angled skins [J]. Composite structures, 2015, 132: 575-583.
- [8] JURECZKO M, PAWLAK M, MEŻYK A. Optimisation of wind turbine blades [J]. Journal of materials processing technology, 2005, 167(2): 463-471.
- [9] 施琴. 小型独立风力发电系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
SHI Q. The research of stand-alone small scale wind turbines generator system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [10] 宗楠楠, 董湘怀. 小型风力机叶片强度的有限元分析 [J]. 太阳能学报, 2010, 31(6): 764-768.
ZONG N N, DONG X H. Finite element analysis of blade strength for small wind turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2010, 31(6): 764-768.
- [11] JAVAID UMAIR, KHAN ZAFFAR M, KHAN M B, et al. Fabrication and thermo-mechanical characterization of glass fiber/vinyl ester wind turbine rotor blade [J]. Composites part B, 2016, 91: 257-266.
- [12] 张文毓. 风电叶片复合材料及其应用[J]. 上海电气技术, 2017, 10(4): 55-57, 63.
ZHANG W Y. Composite material for wind power blade and its application [J]. Journal of Shanghai electric technology, 2017, 10(4): 55-57, 63.
- [13] 王天堂, 陆士平, 武兵. 环氧乙烯基酯树脂在风电叶片行业应用的可行性探讨 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(6): 68-72.
WANG T T, LU S P, WU B. Feasibility discussion on the application of vinyl ester resin in windmill blade fabrication [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2011(6): 68-72.
- [14] 陈建桥. 复合材料力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
CHEN J Q. Mechanics of composites [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.
- [15] 孙丽莉. 玻璃纤维增强树脂基复合材料的细观破坏研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
SUN L L. Mesoscopic failure researches of glass fiber-reinforced resin matrix composites [D]. Ji'nan: Shandong University, 2009.
- [16] 傅志方. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
FU Z F. Theory and application of modal analysis [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [17] 叶枝全, 马昊旻, 丁康, 等. 水平轴风力机桨叶的实验模态分析[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 473-476.
YE Z Q, MA H A, DING K, et al. Experimental model analysis of the rotor blade of the horizontal axis wind turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2001, 22(4): 473-476.

TENSILE AND MODAL CHARACTERISTICS ANALYSIS OF E-GLASS FIBER/VINYL ESTER RESIN

Han Qiaoli¹, Li Wanghao², Xing Weite², Zhang Zheng², Guo Shanshan²

(1. *College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;*

2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*)

Abstract: E-glass fiber/vinyl ester resin composite materials used for the layer structure of small wind turbine blades are carried tensile tests and modal analysis. The following conclusions are obtained through the comparative analysis on the tensile properties and modal properties of different types of fibers, such as the tensile strength, failure modes, modulus of elasticity and so on. The uniaxial 0° laminates have better tensile properties. With the number of layers increases, the uniaxial 0° fiber cloth has the greatest influence on the flapping natural frequency, and the biaxial ±45° fiber cloth has the greatest influence on the torsional natural frequency. The numbers of layers and the laying angles have less influence on the first flapping and torsional vibration modes. Since the small scale wind turbine has higher rotor speed, more uniaxial 0° fiber cloth can be laid so as to make the blade structure and modal properties better. In order to study the correlation between modal parameters of single and multi-layer laminates, it can be analyzed that under the different order of layering the maximum amount of the natural frequency is 1.45 Hz. This study can provide basic theoretical basis for the production and research on E-glass fiber/vinyl ester resin composite blades.

Keywords: composite materials; modal analysis; tensile properties; small wind turbine; blade layer