

随机载荷下风电叶片复合材料剩余强度概率模型

高建雄, 安宗文, 白学宗

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为对随机载荷作用下风电叶片复合材料(即纤维增强复合材料)的剩余强度进行评估,并考虑载荷的随机性及材料性能的分散性对剩余强度概率分布的影响。首先,根据 Miner 理论及全概率公式建立随机载荷作用下风电叶片复合材料疲劳寿命的预测模型;然后,基于剩余强度与剩余寿命取决于材料内部同一损伤状态的假设,推导出随机载荷作用下风电叶片复合材料剩余强度的概率模型;最后,通过风电叶片复合材料层合板(由多个单层板粘接在一起组成的整体结构)的静强度实验数据与疲劳寿命实验数据对所建模型的有效性进行验证。结果表明:所建模型能反映风电叶片复合材料剩余强度退化的一般规律,对随机载荷作用下风电叶片复合材料的寿命预测及可靠性评估具有一定指导意义。

关键词: 风力机; 叶片; 剩余强度; 疲劳; 可靠性

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

风电叶片复合材料,即纤维增强复合材料(fiber reinforced plastics, FRP)是一种经过复合工艺而制成的新型材料,由于具有比强度高、比刚度大、寿命长、结构性能可设计等诸多优点,广泛应用于航空航天、能源、交通、建筑等诸多重要领域^[1,2]。然而,由于风电叶片在长期服役过程中承受随机载荷的反复作用,使得叶片复合材料的疲劳破坏问题日益突出。剩余强度是反映结构承载能力的主要指标,它对于复合材料结构的寿命预测及可靠性评估至关重要。

纤维增强复合材料是由纤维、基体及界面等部分组成,其细观结构实际上是一个复杂的多相体系。在疲劳载荷作用下,纤维增强复合材料损伤的演化机理非常复杂,通常包括基体开裂、界面脱胶及分层、纤维断裂等多种不同的损伤模式。不同损伤模式的萌生、扩展、耦合及转化共同导致纤维增强复合材料性能的退化^[3]。就目前学科的发展现状而言,单纯从复合材料疲劳损伤的物理机理出发,构筑其损伤演化模型是不现实的^[4]。从微观角度去研究复合材料的疲劳损伤往往会使问题变得更加

复杂,所以目前的研究大多是宏观唯象的^[5]。宏观上,疲劳损伤主要表现为复合材料物理性能的下降,如强度退化、刚度退化等。从宏观唯象的角度对复合材料的疲劳损伤进行总体描述,可避开损伤复杂的物理本质和微观机理,降低纤维增强复合材料疲劳问题的研究难度。常见的宏观唯象模型主要有剩余强度模型^[6,7]和剩余刚度模型^[8,9]等。

本文基于 Miner 理论和连续型随机变量的全概率公式,推导出风电叶片复合材料的疲劳寿命预测模型,然后根据剩余强度与剩余寿命取决于材料同一损伤状态的假设,建立风电叶片复合材料剩余强度的概率模型,对随机载荷作用下风电叶片复合材料寿命预测及可靠性评估提供理论依据。

1 叶片复合材料疲劳寿命预测

1.1 疲劳寿命曲线

$\sigma-N$ 曲线是表征复合材料疲劳性能最经典也是很有效的方法,它可不考虑复合材料内部复杂的损伤情况,用宏观的方法来描述复合材料的疲劳特性,因而成为广泛应用的方法^[10]。研究表明,幂函数形式的 $\sigma-N$ 曲线能很好地描述复合材料的疲劳

特性^[11],如式(1)所示。

$$\sigma^m N = C \quad (1)$$

式中, σ ——应力; N ——疲劳寿命; m 、 C ——疲劳性能参数,与材料性质、试样形状及加载方式等有关。

1.2 疲劳寿命预测模型

由于随机风载的作用,使得风电叶片在服役过程中承受高度不稳定的随机载荷。载荷的随机性给叶片复合材料的疲劳寿命预测带来很大困难。为此,本文从概率的角度出发,采用随机变量来描述载荷的随机性特征,并基于 Miner 累积损伤理论及全概率公式构建随机载荷作用下风电叶片复合材料的疲劳寿命预测模型,具体过程如下:

设 σ_i 为随机应力母体 σ 中的一个载荷样本,由式(1)可得:

$$\sigma_i^m N_i = C \quad (2)$$

根据 Miner 累积损伤理论可知,应力 σ_i 作用一次对纤维增强复合材料造成的损伤为:

$$D_i(1) = \frac{1}{N_i} = \frac{\sigma_i^m}{C} \quad (3)$$

若随机应力 σ 的概率密度函数为 $f(\sigma)$,由连续型随机变量的全概率公式可知,随机应力 σ 作用一次对纤维增强复合材料造成的损伤为:

$$D(1) = \int_0^{+\infty} \frac{\sigma^m \cdot f(\sigma)}{C} d\sigma \quad (4)$$

根据 Miner 累积损伤理论可知,随机应力 σ 作用 n 次时对纤维增强复合材料造成的损伤为:

$$D(n) = n \cdot D(1) = n \cdot \int_0^{+\infty} \frac{\sigma^m \cdot f(\sigma)}{C} d\sigma \quad (5)$$

若在随机应力 σ 作用下纤维增强复合材料的疲劳寿命为 N ,根据 Miner 理论的损伤临界法则可得:

$$D(N) = N \cdot D(1) = N \cdot \int_0^{+\infty} \frac{\sigma^m \cdot f(\sigma)}{C} d\sigma = 1 \quad (6)$$

对式(6)进行等价变形,可得随机载荷作用下纤维增强复合材料疲劳寿命的预测模型,如式(7)所示:

$$N = \frac{1}{\int_0^{+\infty} \frac{\sigma^m \cdot f(\sigma)}{C} d\sigma} \quad (7)$$

由式(7)可知,在 σ - N 曲线及随机应力的概率分布已知的条件下,便可对风电叶片复合材料的疲

劳寿命进行预测与评估。在实际应用中, σ - N 曲线可由材料的恒幅疲劳实验获得,随机应力的概率分布一般通过实际监测得到。

2 叶片复合材料剩余强度概率模型

在复合材料中,由于疲劳损伤的形成和发展,使得剩余强度与剩余寿命随载荷作用次数的增加而逐渐降低,所以可假设复合材料剩余强度的下降与其剩余寿命的下降发展相一致^[12]。鉴于此,本文基于同一时刻剩余强度与剩余寿命取决于材料内部同一损伤状态的假设,并考虑剩余强度的固有分散性,根据随机变量分布函数的定义,建立随机载荷作用下叶片复合材料剩余强度的概率模型,具体过程如下:

设纤维增强复合材料的初始强度(即静强度)为 r_0 ,在随机应力 σ 作用 n 次后其剩余强度为 $r(n)$,剩余寿命为 $N-n$ 。则根据剩余强度定义的疲劳损伤 D_1 与根据剩余寿命定义的疲劳损伤 D_2 可分别表示为:

$$D_1 = 1 - \frac{r(n)}{r_0} = \frac{r_0 - r(n)}{r_0} \quad (8)$$

$$D_2 = 1 - \frac{N-n}{N} = \frac{n}{N} \quad (9)$$

事实上,剩余强度与剩余寿命只是从不同的角度出发对材料内部同一损伤状态的不同描述,可以认为材料的剩余强度与剩余寿命基于同样的损伤状态而存在。因此, D_1 与 D_2 之间存在的等量关系如式(10)所示:

$$D_1 = D_2 \quad (10)$$

将式(8)和式(9)代入式(10)后化简可得:

$$\begin{aligned} r(n) &= r_0 \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right) \\ &= r_0 \cdot \left[1 - n \cdot \int_0^{+\infty} \frac{\sigma^m \cdot f(\sigma)}{C} d\sigma\right] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)是确定性框架下叶片复合材料剩余强度的退化轨迹模型,描述的是剩余强度 $r(n)$ 随载荷 σ 及载荷作用次数 n 的确定性变化规律。

然而,由于各种随机因素(如材料微观结构、制造工艺、载荷和服役环境等)的影响,导致复合材料的剩余强度伴随着固有的分散性。因此,有必要从概率的角度出发对叶片复合材料的剩余强度进行建模,具体步骤如下:

设剩余强度 $r(n)$ 的累积分布函数为 $F_r(r)$,根据随机变量分布函数的定义可得:

$$F_r(r)=P\{r(n)\leq r\}$$

(12)

将式(11)代入式(12),可得剩余强度 $r(n)$ 的累积分布函数 $F_r(r)$ 与初始强度 r_0 的累积分布函数 $F_{r_0}(n)$ 之间的关系,如式(13)所示:

$$\begin{aligned} F_r(r) &= P\{r(n)\leq r\} \\ &= P\{r_0\cdot(1-\frac{n}{N})\leq r\} \\ &= P\{r_0\leq \frac{r\cdot N}{N-n}\} \\ &= F_{r_0}(\frac{r\cdot N}{N-n}) \end{aligned}$$

(13)

对式(13)求导,可得剩余强度 $r(n)$ 的概率密度函数 $f_r(r)$ 与初始强度 r_0 的概率密度函数 $f_{r_0}(r_0)$ 之间的关系如式(14)所示,式中的 N 由式(7)确定:

$$\begin{aligned} f_r(r) &= \frac{dF_r(r)}{dr} \\ &= f_{r_0}(\frac{r\cdot N}{N-n})\cdot(\frac{r\cdot N}{N-n})' \\ &= \frac{N}{N-n}\cdot f_{r_0}(\frac{r\cdot N}{N-n}) \end{aligned}$$

(14)

式(14)便是随机载荷作用下叶片复合材料剩余强度的概率模型,描述的是剩余强度的概率分布随载荷作用次数 n 的变化规律。由式(14)可知,材料的剩余强度受随机应力的概率分布(外因)及材料初始强度的概率分布(内因)的共同影响。在实际应用中,仅需已知随机应力的概率分布、材料的初始强度数据及 σ - N 曲线,便可对随机载荷作用下叶片复合材料的剩余演变规律进行预测与评估。

表1 纤维增强复合材料层合板静强度实验数据

Table 1 Static strength test data of fiber reinforced composite laminates

层合板	静强度/MPa										均值/ MPa	标准差/ MPa
[0] _s	811.81	758.52	813.38	827.24	813.58	914.64	827.51	—	—	823.81	46.36	
[90] _s	36.51	32.06	34.55	34.88	34.09	39.31	38.37	—	—	35.68	2.54	
[0/90/0] _s	488.44	479.41	485.59	470.90	478.09	465.33	483.40	448.61	431.73	470.17	18.91	
[45/−45/45] _s	112.31	120.91	111.67	126.83	115.75	122.58	100.61	126.78	106.17	115.96	9.13	
[45/0/−45] _s	552.99	603.81	573.93	612.37	577.53	588.41	604.91	566.18	580.07	584.47	19.65	
[45/0/−45/90] _s	353.82	364.24	383.84	364.14	364.58	377.20	371.99	372.26	361.35	368.16	9.05	

3 实例分析

为对本文所建模型的有效性进行验证,在此以文献[13]中提供的叶片复合材料层合板实验数据为例,实验条件及结果如下:

1) 试样选材:试样材料为中材科技生产的无碱玻璃纤维 E-Glass(EGFW430),树脂为环氧 618,固化剂为苯二甲胺,增塑剂为邻苯二甲酸二丁酯。实验过程中设计 6 种不同铺层方式的试样,分别为: [0]_s, [90]_s, [0/90/0]_s, [45/-45/45]_s, [45/0/-45]_s, [45/0/-45/90]_s (数字 0、90、-45、45 表示纤维的铺设角度)。试样几何尺寸如图 1 所示。

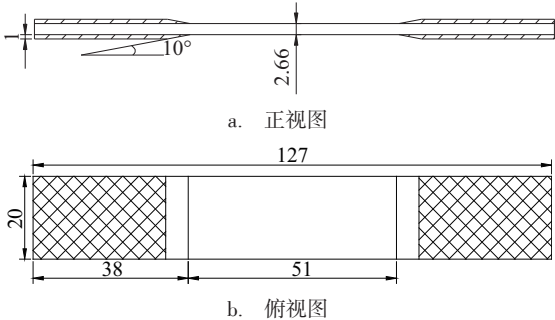


图1 试样几何尺寸(mm)

Fig. 1 Geometric size of specimen (mm)

2)实验方法及结果:选用 MTS809 液压电磁伺服疲劳实验机对试样进行静强度拉伸实验和疲劳实验。静强度拉伸实验采用位移控制加载,加载速率为 1mm/min;疲劳实验采用力控制加载,加载方式为轴向拉-拉循环加载,加载频率为 10 Hz,加载波形为正弦波,应力比为 $r=0$ 。实验结果如表 1 和表 2 所示。

表2 纤维增强复合材料层合板疲劳寿命实验数据
Table 2 Fatigue test data of fiber reinforced composite laminates

层合板	应力/MPa	疲劳寿命/循环数	层合板	应力/MPa	疲劳寿命/循环数
[0] _s	659	380,555,733,652	[90] _s	29	83,403,265
	577	5670,4253,7973,3816		25	3373,2459,1837,1432
	535	9134		23	1270,5374
	494	36982,878,66539,29100,24575		21	11262,5160,18024,3760,3476,13218
	437	200413,136795,238721,144387		20	67411
	—	—		18	597885,102346,6594,64041
[0/90 ₂ /0] _s	376	722,720,376,420	[45/-45 ₂ /45] _s	93	186,196,219,150
	329	875,2810,2304,1798,2812		81	350
	282	7234,21872,40180,15566		70	1208,1283,1365,1058
	235	100795,236136,165933,163685		58	4835,7029,14054,10391
	—	—		52	127729,66427,64759,85131
	—	—		49	494832,234674,265142
[45/0 ₂ /-45] _s	468	314,203,259,304	[45/0/-45/90] _s	295	172,204,172,196
	409	865		258	547
	380	2341,2155,1616,1838		239	1045,1155,1210,1929
	310	19740,20099,19989,28210		202	11160,7883,9742,9338
	292	81674,30307		166	51638
	263	123936,105527,160743,112380		147	155501,145983,168040,170550

在实际工程中,双参数 Weibull 分布常常被用来描述复合材料层合板静强度的分布规律,其形状参数 β 和尺度参数 θ 通常可由式(15)和式(16)确定^[14]:

$$\beta=[\frac{\sqrt{D(r_0)}}{E(r_0)}]^{-1.086}$$

(15)

$$\theta=\frac{E(r_0)}{\Gamma(\frac{1}{\beta}+1)}$$

(16)

式中, $E(r_0)$ ——复合材料层合板静强度均值;
 $D(r_0)$ ——复合材料层合板静强度方差。

根据式(15)和式(16),对表 1 中的 6 种不同铺层方式下纤维增强复合材料层合板的静强度数据进行拟合,得到双参数 Weibull 分布的形状参数 β

和尺度参数 θ 的估计值,如表 3 所示。

表3 纤维增强复合材料层合板静强度分布参数
Table 3 Static strength distribution parameters of fiber reinforced composite laminates

层合板	形状参数 β	尺度参数 θ
[0] _s	22.7590	843.6595
[90] _s	17.6465	36.7732
[0/90 ₂ /0] _s	32.7750	478.1594
[45/-45 ₂ /45] _s	15.8043	119.8863
[45/0 ₂ /-45] _s	39.8144	592.6979
[45/0/-45/90] _s	55.9399	371.8794

然后,利用最小二乘法对表 2 中 6 种不同铺层方式下纤维增强复合材料层合板的疲劳实验数据进行

回归分析,得到不同铺层方式下层合板 $\sigma-N$ 曲线的参数估计值,如表4所示。

表4 纤维增强复合材料层合板 $\sigma-N$ 曲线参数

Table 4 $\sigma-N$ curve parameters of fiber reinforced composite laminates

层合板	m	C
$[0]_s$	13.6411	1.8312×10^{41}
$[90]_s$	14.1169	8.5804×10^{22}
$[0/90_2/0]_s$	12.4068	4.5375×10^{34}
$[45/-45_2/45]_s$	11.5638	5.0574×10^{24}
$[45/0_2/-45]_s$	11.1593	1.4150×10^{32}
$[45/0/-45/90]_s$	9.9381	6.0574×10^{26}

在实际服役过程中,若通过监测得到叶片复合材料所承受的随机应力 σ 服从均值为20 MPa,标准差为5 MPa的正态分布。则根据式(7)可计算得到不同铺层方式下叶片复合材料层合板的疲劳寿命,如表5所示。

表5 随机载荷下纤维增强复合材料层合板疲劳寿命

Table 5 Fatigue life of fiber reinforced composite laminates under random loading

层合板	疲劳寿命/ 循环数	层合板	疲劳寿命/ 循环数
$[0]_s$	1.0891×10^{22}	$[90]_s$	995.8607
$[0/90_2/0]_s$	1.8320×10^{17}	$[45/-45_2/45]_s$	3.5748×10^8
$[45/0_2/-45]_s$	3.9288×10^{17}	$[45/0/-45/90]_s$	1.0229×10^{13}

由表5可知,若层合板中所包含的 0° 层纤维越多,则层合板的疲劳寿命相对越大。在 0° 层纤维相同的条件下,若其他层纤维方向与轴向载荷的夹角越小,则层合板的疲劳寿命相对越大。这是因为在轴向拉-拉载荷作用下,纤维(玻璃纤维)是主要的承载材料,控制着复合材料层合板的主要力学性能,基体(环氧树脂)主要起固定纤维及传递纤维间载荷的作用,通常只能承受压应力及剪切应力。

最后,根据式(14)可计算得到不同载荷循环次数下叶片复合材料层合板剩余强度的分布及变化规律,如图2所示。

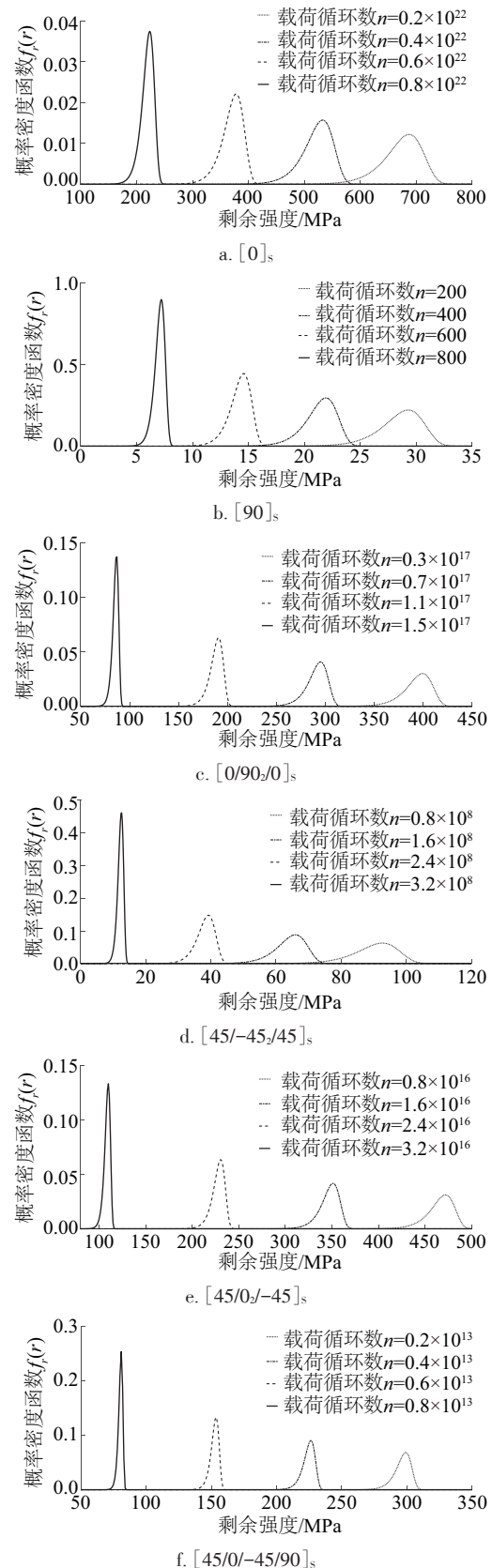


图2 纤维增强复合材料层合板剩余强度

Fig. 2 Residual strength of fiber reinforced composite laminate

由图 2 可知:一方面,当载荷作用次数 n 为某一确定值时,纤维增强复合材料层合板的剩余强度 $r(n)$ 是一个随机变量,且服从某一特定的概率分布,满足强度退化规律的随机性;另一方面,随着载荷作用次数 n 的增加,纤维增强复合材料层合板剩余强度 $r(n)$ 的概率密度函数曲线 $f_r(r)$ 逐渐向左移动,满足强度退化规律的不可逆性。另外,对于不同铺层方式的复合材料层合板而言,其剩余强度的演化规律也存在较大的差异,这是因为纤维的铺设角度、单向板的铺设顺序以及铺设层数等均对叶片复合材料层合板的疲劳性能及损伤演化规律有很大影响。

从以上建模及分析过程可看出,与已有方法相比,本文方法具有以下主要特点:

1) 考虑外部载荷的随机性特征。已有的剩余强度模型大多只适用于恒幅循环载荷或多级恒幅循环载荷等简单的载荷工况,对随机载荷作用下材料的强度退化规律则无力描述。本文方法从概率的角度出发,在建模过程中将载荷视为随机变量,所建模型能反映载荷的随机性对叶片复合材料剩余强度变化规律的影响。

2) 考虑材料性能的分散性特征。已有的剩余强度模型大多是建立在确定性基础之上的退化轨迹模型,未考虑材料性能的固有分散性对剩余强度变化规律的影响。本文根据随机变量分布函数的定义,在建模过程中将材料的初始强度视为随机变量,基于概率方法建立叶片复合材料剩余强度的概率模型。

4 结 论

本文通过对随机载荷作用下风电叶片复合材料剩余强度的退化及分布规律进行研究,得出以下主要结论:

1) 考虑外部载荷的随机性及材料属性的分散性,基于 Miner 累积损伤理论、全概率公式及剩余强度与剩余寿命取决于同一损伤状态的假设,构建随机载荷作用下风电叶片复合材料剩余强度的概率模型。

2) 该模型形式简单、参数少、便于工程应用,仅在已知材料基本性能数据及应力分布的前提下,便可实现随机载荷作用下叶片复合材料的剩余强度进行预测与评估。

3) 通过对 6 种不同铺层方式下复合材料层合板的剩余强度进行分析,结果表明该模型能够很好反映外因(载荷)及内因(材料属性)共同影响下叶片复合材料强度退化的一般规律(随机性与不可逆性),对随机载荷作用下风电叶片复合材料的疲劳寿命预测及可靠性评估具有一定指导意义。

[参考文献]

- [1] 石可重,赵晓路,徐建中.大型风电机组叶片疲劳试验研究[J].太阳能学报,2011,32(8):1264—1268.
- [1] Shi Kezhong, Zhao Xiaolu, Xu Jianzhong. Research on fatigue test of large horizontal axis wind turbine blade [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32 (8) : 1264—1268.
- [2] 孟维迎,孙鹏文,张兰挺,等.基于能量法的复合材料层合板性能等效算法研究与应用[J].太阳能学报,2014,35(8):1505—1510.
- [2] Meng Weiyong, Sun Pengwen, Zhang Lanting, et al. Research and application of property equivalence algorithm for composite lamination plate based on energy method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35 (8): 1505—1510.
- [3] Wicaksono S, Chai Gin-Boay. A review of advances in fatigue and life prediction of fiber-reinforced composites [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L, Journal of Materials Design and Applications, 2013, 227(3): 179—195.
- [4] 童小燕,万小鹏,孙 秦,等.复合材料的疲劳寿命预测[J].机械强度,1995,17(3):94—101.
- [4] Tong Xiaoyan, Wan Xiaopeng, Sun Qin, et al. Fatigue life prediction of composite material structures and components[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995, 17(3): 94—101.
- [5] 贾宝惠,李顶河,李 伟,等.基于疲劳损伤两段论的复合材料刚度降模型研究[J].玻璃钢/复合材料,2010,(1):16—19.
- [5] Jia Baohui, Li Dinghe, Li Wei, et al. Research on stiffness reduction of composite laminates based on the two-stage theory of fatigue damage[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010, (1): 16—19.
- [6] Koo Jae-Mean, Choi Jung-Hun, Seok Chang-Sung. Prediction of residual strength after impact of CFRP composite structures[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15

- (7): 1323—1329.
- [7] D' Amore A, Giorgio M, Grassia L. Modeling the residual strength of carbon fiber reinforced composites subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 78: 31—37.
- [8] 傅程, 王延荣. 风力机叶片损伤演化模拟[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(1): 143—148.
- [8] Fu Cheng, Wang Yanrong. Damage evolution prediction of wind turbine blades[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(1): 143—148.
- [9] Soutis C, Kashtalyan M. Residual stiffness of cracked cross-ply composite laminates under multi-axial in-plane loading[J]. *Applied Composite Materials*, 2011, 18(1): 31—43.
- [10] 金宏彬. 复合材料疲劳 $S-N$ 曲线的建模[J]. *玻璃钢/复合材料*, 1999, (6): 18—21.
- [10] Jin Hongbin. Modeling fatigue $S-N$ curves of composite materials[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 1999, (6): 18—21.
- [11] Vassilopoulos A P. Fatigue life prediction of composites and composite structures[M]. Woodhead Publishing, 2010, 62—75.
- [12] 潘盼, 蔡新, 朱杰, 等. 风力机叶片疲劳寿命研究概述[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012, (4): 129—133.
- [12] Pan Pan, Cai Xin, Zhu Jie, et al. Overview of fatigue research for wind turbine blade[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012, (4): 129—133.
- [13] 杨忠清. 玻璃纤维增强树脂基复合材料疲劳行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [13] Yang Zhongqing. Research on fatigue behavior of glass fiber reinforced polymer composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [14] 郭新生. 风能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007, 12—18.
- [14] Guo Xinsheng. Wind energy utilization technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 12—18

PROBABILISTIC MODEL OF RESIDUAL STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS FOR WIND TURBINE BLADE UNDER RANDOM LOAD

Gao Jianxiong, An Zongwen, Bai Xuezhong

(School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to evaluate the residual strength of wind turbine blade composite materials (that is, fibre reinforced composite materials) under random load, the effect of load randomness and dispersion of material properties on the probability distribution of residual strength is considered. Firstly, the prediction model of fatigue life for wind turbine blade composite materials under random load is proposed based on the Miner theory and whole probability formula. Then the probabilistic model of residual strength of wind turbine blade composite materials under random loads is derived based on the assumption that the residual strength and residual fatigue life depend on the same damage state in materials. Finally, the effectiveness of the proposed model is verified through the static strength test data and fatigue life test data of wind turbine blade composite laminates (a whole structure composed of multiple single layer plates). The results show that the proposed model can reveal the general degradation law of residual strength of wind turbine blade composite materials, which has an important guiding significance for fatigue life prediction and reliability assessment of wind turbine blade composite materials under random load.

Keywords: wind turbine; blade; residual strength; fatigue; reliability