

Fatigue Damage Mechanism Analysis on Multi-MW Wind Turbine Blade

Dong Xiaohui, Zhen Shucong, Feng Wei

Yancheng Institute of Technology, Yancheng, China

dxhzsc@163.com

Abstract: According to the actual ply scheme of multi-MW wind turbine blade, using Talerja's vector damage model, fatigue damage vector model of matrix and interface were derived, and the fatigue damage mechanism was analyzed. The constitutive relations for the plane stress problems of composite uni-ply plates with damage to wind turbine blade were obtained. The results show that the crack of perpendicular to the fiber direction does not affect the material properties, while the crack of parallel to the fiber direction will become the transversely isotropic performance of materials to the orthotropic anisotropic performance of material.

Keywords: multi-MW wind turbine; blade; fatigue damage mechanism; vector damage model; constitutive relations

MW 级风力机叶片疲劳损伤机理分析

董晓慧, 甄树聪, 冯 伟

盐城工学院, 盐城, 中国, 224051

dxhzsc@163.com

【摘 要】根据 MW 级风力机叶片的铺层特点, 采用 Talerja 矢量损伤模型, 推导出了基体和界面疲劳损伤矢量模型, 并对其损伤机理进行了分析, 在此基础上, 建立了风力机叶片复合材料单层板平面应力问题的损伤本构关系, 得出了垂直于纤维方向的裂纹不影响材料的性能, 而平行于纤维方向的裂纹会使材料的性能由横观各向同性变为正交各向异性。

【关键词】MW 级风力机; 叶片; 疲劳损伤机理; 矢量损伤模型; 本构关系

1. 引言

复合材料风力机叶片是风力发电系统的关键部件之一, 占整机组造价的 20% 左右, 它的性能、强度和刚度是风力机可靠性的关键^[1]。MW 级风力机叶片重量很大, 一旦损坏对风力机结构的破坏不可估量。

为确保 MW 级风力机组的总体性能, 研究 MW 级风力机在疲劳载荷作用下的损伤机理, 对叶片的结构强度分析和可靠性设计具有重要意义。目前, 国内外对于 MW 级风力机叶片疲劳损伤机理的研究相对较少。本文基于 Talerja 矢量损伤理论, 分析了风力机叶片疲劳损伤机理, 并建立了单层板平面应力问题的损伤本构关系, 为 MW 级风力机叶片损伤分析与识别提供理论基础。

2. MW 级风力机叶片疲劳损伤机理

2.1 MW 级风力机叶片损伤分析

MW 级风力机叶片主要由玻璃钢或碳纤维作为增

强体粘结基体(树脂纤维)构成的复合材料进行铺层制成的薄壳结构, 其壳体铺层层数多, 最多处达 30 层之上, 最少也接近 10 层, 而单层的种类一共只有四种, 而这四种单层的基体材料是一样的, 纤维种类也一样, 只是纤维的形式或方向不一样^[2], 壳体的一般铺层是由 $\pm 45^\circ$ 纤维的基础复合压层和夹层板(沿叶片纵向方向)组成, 主复合压层和加强复合压层都为 0° 方向的单向纤维。由各单层纤维的种类和单层纤维的方向可以看出, 各层之间的差别比较小, 即各层之间的相互作用比较小, 因此, 整个叶片壳体的损伤主要是由于单层复合材料的损伤造成的, 而单层板材料性能表现为横观各向同性, 其主要损伤发生在基体以及基体与纤维粘合的界面上, 主要损伤形式有基体开裂、界面剥离、纤维断裂、界面脱胶等。

2.2 基体疲劳损伤机理

树脂基体主要表现为横向的力学性能, 用纤维增

强后主要影响复合材料的纵向力学性能，当承受横向压缩载荷时，会出现基体裂纹造成叶片损伤。

设坐标系为平行于纤维方向为 1 轴，垂直于纤维方向为 2 轴，垂直并指向铺层面外方向为 3 轴，记基体损伤模式 $a=1$ ，根据 Talerja 矢量损伤模型^[3-7]，则损伤矢量为

$$D^{(1)} = D^{(1)}n^{(1)} \quad (1)$$

$$[D^{(1)}]^2 = \frac{Kt_c^2}{ts \cos \theta} \quad (2)$$

式 (1) 中， $D^{(1)}$ 为对裂纹平面取向 $a=1$ 的损伤矢量， $n^{(1)}$ 为垂直于裂纹平面取向 $a=1$ 的单位矢量。式 (2) 中， K 为常数， t_c 为损伤层厚度， s 为沿基体纵向的平均裂纹间距， θ 为裂纹平面与垂直于纤维方向的夹角。

联立式 (1) 和式 (2) 可得损伤矢量 $D^{(1)}$ 的分量：

$$\begin{aligned} D_1^{(1)} &= t_c \sqrt{\frac{K \cos \theta}{ts}} \\ D_2^{(1)} &= t_c \sin \theta \sqrt{\frac{K \cos \theta}{ts}} \\ D_3^{(1)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，基体损伤裂纹按照方向可以分为两种，一种是平行于纤维方向上的基体损伤裂纹，一种是垂直于纤维方向的基体损伤裂纹。对于第一种基体损伤裂纹产生的原因是因为当风力机叶片复合材料层合板在受到载荷作用时，由于铺层角的变化和相邻铺层之间面内刚度的不均匀，会产生较大的垂直于纤维方向的剪应力引起平行于纤维方向的基体开裂；而对于第二种情况是由于垂直于纤维的面内剪应力和层间剪应力引起的。当风力机叶片复合材料层合板承受横向交变载荷冲击时，在平行于纤维的方向上会产生最大的拉伸应力，在垂直于纤维的方向上会产生最大的正应力，使裂纹在平行于纤维方向上张开，在垂直于纤维方向上扩展，当达到临界值时造成纤维和基体的脱离。

2.3 界面疲劳损伤机理

界面损伤也是风力机叶片复合材料层合板产生损伤的重要形式之一。根据 Talerja 矢量损伤模型，坐标系设置同 2.2 节，记界面损伤模式 $a=2$ ，则损伤矢量为

$$D^{(2)} = D^{(2)}n^{(2)} \quad (4)$$

$$[D^{(2)}]^2 = \eta qa^3 \quad (5)$$

式 (4) 中， $D^{(2)}$ 为对裂纹平面取向 $a=2$ 的损伤矢量，

$n^{(2)}$ 为垂直于裂纹平面取向 2 的单位矢量。式 (5) 中， η 为裂纹密度（单位体积裂纹数）， q 为常数， a 为圆形裂纹直径的平均值。

联立式 (4) 和式 (5) 可得损伤矢量 $D^{(2)}$ 的分量：

$$\begin{aligned} D_1^{(2)} &= 0 \\ D_2^{(2)} &= 0 \\ D_3^{(2)} &= \sqrt{\eta qa^3} \end{aligned} \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出，界面损伤是基体裂纹向界面扩展的结果，当叶片内某层基体产生损伤裂纹后，该基体裂纹在面内正应力和层间剪应力的影响下进一步扩展，由于铺层界面的约束导致面内正应力和层间剪应力的水平升高，进一步引起基体裂纹的扩展，如此循环，当达到临界值时引发分层破坏。

3. 基于疲劳损伤机理的损伤本构关系

3.1 疲劳损伤本构关系

取局部坐标为平行于纤维方向记为 1 轴，垂直于纤维方向为 2 轴，垂直并指向铺层面外方向为 3 轴，对于损伤为裂纹缺陷的横观各向同性材料的风力机叶片复合材料单层板，采用 Talreja 二阶对称张量描述损伤，基于 Pipkin 和 Rivlin 的 n 个矢量多项式整基确定方法，则纤维增强复合材料的不变基为

$$\begin{aligned} &\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{23}^2, \epsilon_{12}\epsilon_{21}, \epsilon_{12}\epsilon_{23}\epsilon_{31} \\ &D_1^{(1)}, D_2^{(1)}\epsilon_{21}, D_2^{(1)}\epsilon_{23}\epsilon_{31}, D_2^{(1)}D_2^{(2)}, D_2^{(1)}\epsilon_{23}D_3^{(2)} \end{aligned} \quad (7)$$

对于单一损伤矢量 D ，小应变条件下横观各向同性材料的弹性势能为

$$\begin{aligned} W &= W^0 + W^1 \\ W &= W(\epsilon, D^{(a)}) \end{aligned} \quad (8)$$

根据应变公式

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \epsilon} \quad (9)$$

并采用 Voigt 记号，则应力可表示为

$$\sigma_p = (C_{pq}^0 + C_{pq}^1)\epsilon_q \quad (10)$$

式 (10) 中，系数矩阵 $[C_{pq}^0]$ 和 $[C_{pq}^1]$ 为对称矩阵，

其中，对于 $[C_{pq}^0]$ ：

$$\begin{aligned} C_{11}^0 &= 2A_1 \\ C_{12}^0 &= C_{21}^0 = C_{13}^0 = C_{31}^0 = A_2 \\ C_{22}^0 &= 2(B_1 + C_1) = C_{33}^0 \\ C_{23}^0 &= C_{32}^0 = 2B_1 \\ C_{44}^0 &= 2C_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$C_{55}^0 = C_{66}^0 = G_1$$

其余系数都等于 0

由式 (11) 可以看出, 系数矩阵 $[C_{pq}^0]$ 为无刚度矩阵, 即广义胡克定律中的弹性系数矩阵。

3.2 垂直于纤维方向的损伤本构关系

对于单层板内垂直于纤维方向的基体开裂问题, 损伤矢量为

$$D = D_M(1, 0, 0)$$

由于该类型裂纹平行于由坐标 2 和坐标 3 构成的平面, 可以忽略该裂纹对坐标 2-3 平面内刚度的影响。令 $\sigma_3 = 0$, 则得到适用于垂直于纤维方向的裂纹损伤单层板的平面应力本构关系

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = [C_{pq}^0 + C_{pq}^1] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

其中

$$[C_{pq}^0] = \begin{bmatrix} 2A_1 & A_2 & 0 \\ & 2(B_1 + C_1) & 0 \\ & & G_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[C_{pq}^1] = \begin{bmatrix} 2A_3 D_N^2 & A_7 D_N^2 & 0 \\ & 2(B_2 + C_2) D_N^2 & 0 \\ & & \frac{1}{2} G_2 D_N^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式 (13) 和式 (14) 可以看出, 两系数矩阵具有相同的形式, 说明材料的弹性行为仍具有横观各向同性的对称性质。

3.3 平行于纤维方向的损伤本构关系

对于单层板内垂直于纤维方向的基体开裂问题, 损伤矢量为

$$D = D_p(1, 0, 0)$$

由于该类型裂纹平行于由坐标 1 和坐标 3 构成的平面, 可以忽略它对该平面内刚度的影响。令 $\sigma_3 = 0$, 则得到适用于平行于纤维方向的裂纹损伤的单层板的平面应力本构关系

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = [C_{pq}^0 + C_{pq}^1] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$[C_{pq}^1] = \begin{bmatrix} 2A_5 D_p^2 & (A_6 + A_8) D_p^2 & 0 \\ & 2(B_4 + B_5 + C_3) D_N^2 & 0 \\ & & \frac{1}{2} (G_3 + F_1) D_N^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由无刚度矩阵式 (13) 和系数矩阵式 (16) 可以看出, 这时两系数矩阵表现出了正交各向异性, 说明材料的弹性行为不再具有横观各向同性的对称性质。

4. 结论

1) 在分析风力机叶片损伤机理的基础上, 应用 Talerja 矢量损伤模型分析了基体和界面疲劳损伤机理, 得出基体的损伤是由于垂直于纤维方向的剪应力引起平行于纤维方向的基体开裂和由于垂直于纤维的面内剪应力与层间剪应力共同作用引起垂直于纤维方向上的纤维与基体脱离的共同影响, 而界面损伤是由于基体裂纹向界面扩展的结果。

2) 采用 Talerja 张量内变量损伤模型, 建立了基于损伤机理的叶片复合材料单层板的平面应力问题的疲劳损伤本构关系。从本构关系可以看出, 垂直于纤维方向的裂纹不影响材料的性能, 而平行于纤维方向的裂纹会使材料的性能由横观各向同性变为正交各向异性。

3) 本文仅对风力机叶片的损伤机理进行了分析, 对于损伤演化本身则未进行本构描述, 需做进一步的研究。

References (参考文献)

- [1] XuYuxiu, Zhang Chengdong, Strain Response Fractal Characteristic and Damage Identification of a Wind Turbine Blade[J], *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, 28(1), P108-110, 116(Ch).
徐玉秀, 张承东, 风力机叶片应变响应分形特征及损伤识别研究[J], *机械科学与技术*, 2009, 28(1), P108-110, 116.
- [2] Fu Cheng, Wang Yanrong, Damage Evolution Prediction of Wind Turbine Blades[J], *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (1), P104-106(Ch).
傅程, 王延荣, 风力发电机叶片损伤演化预测方法研究[J], *机械设计与制造*, 2009, (1), P104-106.
- [3] Talreja R, Transverse cracking and stiffness reduction in composite laminates[J], *J. Comp. Mater*, 1985, 19, P355-375.
- [4] Talreja R, A continuum mechanics characterization of damage in composite materials[J], *Proc. R. Soc. Lond.*, 1985, A399, P195-216.
- [5] Talreja R, Stiffness properties of composite laminates with matrix cracking and interior delamination[J], *Engng. Fract. Mech.*, 1986, 25, P751-762.
- [6] Talreja R. Modeling of Damage Development in composite using internal variables concepts[A]. *Symp. Damage Mech. composites, AD-12, ASME Winter Annual meeting, USA[C]*, 1987, P11-16.
- [7] Talreja R. Continuum Modeling of the development of intralaminar cracking in composite laminates. *Advances in Fract Research, Proc. ICF-7*, 1989, 4, P2191-2199.