

基于 UMAT 的风机叶片复合材料 横向微观尺度力学响应分析

孙耀宁, 王艳飞, 朱子剑

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 采用随机纤维分布阵列的代表性体积单元(RVE),并根据体积单元整体的受力特性对其边界条件进行设定,通过运行脚本快速有效地施加周期性边界条件。运用 Abaqus 材料子程序 UMAT 建立材料的损伤模型,并且通过有限元数值模拟对损伤模型进行了验证,得到了叶片复合材料受到不同横向载荷作用下的微观尺度力学响应,进一步展现了叶片受外载荷影响所引起的微观尺度的破坏趋势。

关键词: UMAT; 风机叶片复合材料; 微观尺度; 力学响应; 横向行为

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2015)09-1362-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2015.09.014

0 引言

叶片是风机中以复合材料为基础的一类重要部件。叶片复合材料长期受到载荷作用,内部会出现不同形式的损伤破坏,对复合材料的原有强度和刚度产生一定影响。复合材料性质往往决定了风机的性能和使用寿命^[1,2]。

对叶片材料的破坏过程进行建模分析,学者们提出了许多分析方法,其中包括基于剪切滞后的模型,纤维束模型。此外,Aveston 提出了基于经典断裂力学的基体开裂模型^[3]。Marshall 使用应力强度方法来决定复合材料中基体开裂应力^[4]。Budiansky 考虑复合材料中稳态基体裂纹的扩展、初始基体应力的结果、摩擦能以及潜在能量改变^[5]。在上述模型中,均考虑了裂纹面上纤维的作用和外力的连续重新分布。此后,Wongsto 在复合材料横截面中,随机干涉初始正方形和正六边形周期分布^[6]。Mishnaevsky 采用随机顺序吸附产生了颗粒增强复合材料的 2D 模型,之后扩展到 3D 纤维增强复合材料的 UD 模型,进行损伤的预测^[7]。

由于损伤过程的复杂性,到目前为止微观力学对横向断裂行为的研究侧重于初始损伤的研究。考虑到叶片中部作为前部到根部的过渡部分,既要考虑空气动力性能,又要考虑材料有足够的刚度,能够承载部分剪切力、挤压力。因此本文通

过对 Abaqus 用户材料子程序 UMAT 的运用,主要针对叶片中部复合材料建立代表性体积单元,对其在载荷作用下的损伤发展过程与趋势进行一定的论证。

1 有限元模型的建立

目前广泛应用的风机叶片多是由长纤维增强聚合物基复合材料制造而成。从统计学的角度来看,纤维增强复合材料中的增强相在基体中具有周期性的分布特征。基于这种分布特征,研究人员假设纤维增强复合材料的微观结构是周期性的,以此将复合材料看作是由代表性体积单元(Respective Volume Element, RVE)通过周期性累加而成,来研究复合材料微观结构的各种行为^[8]。具体为在有限元分析中,将复合材料看成是由 RVE 周期性扩展累加而成,对复合材料施加均匀的远场外载荷。对于每一个 RVE 而言,由于它们具有相同的阵列形式,所以它们的应力应变场是相似的。因此,一个 RVE 上所表现出来的应力应变场完全可以体现出复合材料的微观应力应变场。这也就是说,可以将微观力学有限元方法应用到一个代表性体积单元上,对一个 RVE 进行有限元求解,获得其力学响应以及复合材料的微观变化,再根据等效方法最终得到复合材料的整体力学性能^[9]。

收稿日期: 2015-04-13。

基金项目: 国家自然科学基金(51465055);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2014211A010);

国家重点实验室开放课题(sklms2014005)资助项目。

作者简介: 孙耀宁(1977-),女,博士,副教授。主要研究方向为复合材料制备及性能测试,机械产品寿命预测。

E-mail:sunyaoning2004@126.com

在实际的复合材料结构中,纤维的分布是随机的,并没有规则性可言(图1)。因此,对于长纤维增强复合材料来说具有横向各向异性^[10]。经研究得知聚合物基体复合材料的横向本构行为受到增强体分布形式的影响,是增强体空间分布的函数。

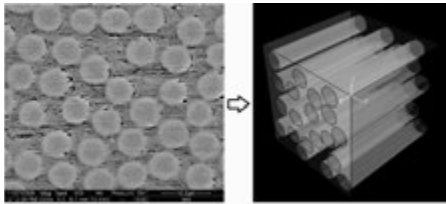


图1 复合材料横截面纤维随机分布 SEM 图与 RVE 示例

Fig.1 Composite cross-sectional SEM image of randomly distributed fibers and RVE example

本文借鉴张超的方法,利用 Python 语言对划分的四面体(Tet)单元网格自动识别六个边界面上的节点(nodes)、八个顶点节点和十二条棱边节点建立集合,之后进行位移耦合;在节点上施加相应的约束方程,快速准确地对体积单元施加周期性边界条件^[11]。

2 材料本构模型

复合材料微观力学分析的另一个重要方面就是组分的本构关系。基体材料具有压力依赖性和剪切作用下的极度延展性能。多数文献在模拟这些性能时使用的是标准的非线性模型,例如 Mohr-Coulomb 模型、Drucker-Prager 模型^[12]。实验表明,这些模型并不特别适合模拟环氧树脂的力学行为,为了更准确地预测在环氧树脂基体中损伤的萌生和扩展,需要在本构模型中包含各向同性损伤模型。在使用的损伤模型中考虑裂纹扩展时的能量耗散。通过考虑失效引起的应变硬化和刚度衰减,可以反映任何负载条件下的本构响应。RVE 需考虑不同组分相的力学行为,即纤维和树脂基体以及纤维与基体之间界面的力学行为,典型树脂基体的初始弹性行为通过应力张量 σ 和弹性应变 ε^e 之间的线性相关定义^[13]。

纤维和基体间的界面相使用 Abaqus/Standard 中的 cohesive surface 单元进行模拟,界面的力学行为应用 traction-separation 法则模拟。

模拟选用的组分材料的性能参数如表 1 所示^[14]。纤维和基体均假设为各向同性的均质弹性性能,纤维体积分数为 40%。

表1 组分材料性能参数
Table 1 Parameters of material properties

组分	模量/GPa				强度/MPa			泊松比
材料	E_1	$E_2=E_3$	$G_{12}=G_{13}$	G_{23}	X_T/Y_n	X_C/Y_T	X_S	$\nu_{12}=\nu_{13}$
纤维	225	15	15	7	3350	2500	—	0.2
基体	4.2	4.2	1.567	1.567	69	250	50	0.34
界面	4.2	4.2	1.567	1.567	60	200	—	0.176

表中: E_1, E_2, E_3 分别为各组分相在 x, y, z 方向的杨氏模量; G_{12}, G_{13}, G_{23} 分别为各组分相在 xy, xz 和 yz 方向的剪切模量; $X_T/Y_n, X_C/Y_T, X_S$ 表示组分相沿 x 方向的拉伸强度、压缩强度以及剪切强度; ν_{12}, ν_{23} 分别为各组分相在 xy, xz 方向的泊松比; yz 方向的泊松比可由 ν_{12}, ν_{23} 得出。

3 代表性体积单元损伤模拟

根据基体材料的本构模型以及基体的损伤准则,运用 Fortran 语言编写材料损伤子程序,子程序将与 Abaqus 中自定义的纤维和界面相损伤模型结合,用来计算纤维增强复合材料代表性体积单元从失效起始直至破坏的过程,获得微观力学响应。子程序向 Abaqus 主程序提供材料本构模型的雅可比矩阵:

$$[J(\{\varepsilon\})]^{t+1,k} = \left[\frac{\partial(\Delta\sigma)}{\partial(\Delta\varepsilon)} \right]^{t+1,k} = \frac{\partial[\sigma^{t,\infty} + (\Delta\sigma)^{t+1,k}]}{\partial[\varepsilon^{t,\infty} + (\Delta\sigma)^{t+1,k}]} = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \right)^{t+1,k} = \left\{ \frac{\partial[C(\varepsilon) \cdot \varepsilon]}{\partial\varepsilon} \right\}^{t+1,k} \quad (1)$$

式中: t 为时间步; $\Delta\sigma$ 为应力增量; $\Delta\varepsilon$ 为应变增量; σ, ε 分别为所在迭代步中的应力和应变; k 为 $(t+1)$ 时间步中的第 k 次迭代; C 为刚度矩阵。

$$C = \begin{cases} C_{11} = \frac{E_1(1-\nu_{23}^2)}{a}; \\ C_{12} = \frac{E_2(1-\nu_{12}\nu_{21})}{a} = C_{33}; \\ C_{12} = C_{13} = C_{44} = C_{55} = \frac{E_2(1-\nu_{12}-\nu_{23})}{a}; \\ C_{23} = C_{66} = \frac{E_2(\nu_{23}+\nu_{12}\nu_{21})}{a} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a=1-2\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}^2-2\nu_{12}\nu_{21}\nu_{23}$, ν_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$) 为基体材料在不同方向的泊松比。

根据复合函数求导法则:

$$\frac{\partial\sigma_i}{\partial\varepsilon_j} = C_{ij}^d + \sum_{k=1}^{NTENS} \frac{\partial C_{ik}^d}{\partial\varepsilon_j} \varepsilon_k = C_{ij}^d + \left[\left(\sum_{k=1}^{NTENS} \frac{\partial C_{ik}^d}{\partial d_m^v} \varepsilon_k \right) \frac{\partial d_m^v}{\partial d_m} \cdot \frac{\partial d_m}{\partial\varepsilon_j} \right] \quad (3)$$

式中: $NTENS$ 为应力或应变向量的维数; d_m 为损伤变量; d_m^v 为当前增量步的黏性化损伤变量, 由式(5)给出定义; C^d 为折减后的刚度矩阵。

$$C^d = \begin{bmatrix} C_{11} & \beta C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & \beta C_{22} & \beta C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \beta C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ sym & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\beta = (1 - d_m^v)$ 。

通过对刚度矩阵进行折减来更新应力矩阵。在 Abaqus/Standard 隐式求解中, 会出现单元刚度矩阵折减而产生的收敛困难, 文中将会使用黏性正则化方法来确保整体求解的收敛性, 它可以在较小的增量步内使受损单元的切线刚度矩阵保持正定。此时, 当前增量步的黏性化损伤变量 d_m^v 为

$$d_m^v = \frac{\eta}{\eta + \Delta t} d_{m,old}^v + \frac{\eta}{\eta + \Delta t} d_m \quad (5)$$

式中: η 代表粘性系数; Δt 为时间增量; $d_{m,old}^v$ 为上一个增量步迭代所得的黏性化损伤变量, 它的值通常会选取与时间增量相比较小的值。

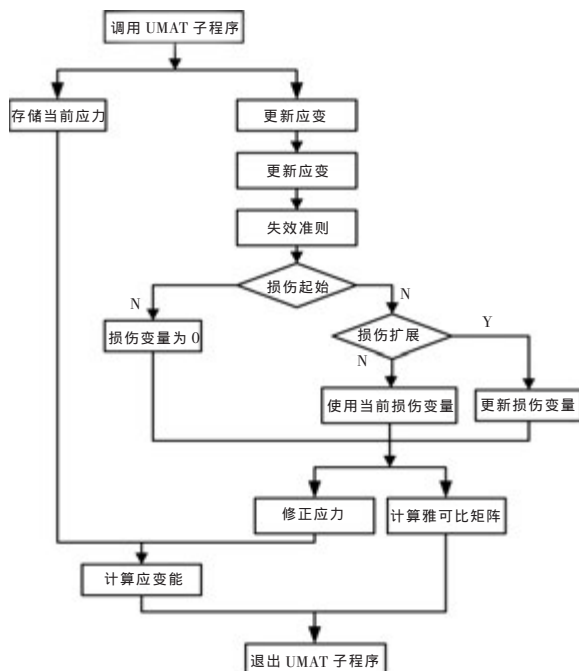


图 2 UMAT 流程图

Fig.2 UMAT flow chart

图 2 为 UMAT 子程序详细的计算过程。通过向 Abaqus 主程序提供材料本构模型计算所需要的雅可比矩阵, 获得代表性体积单元的整体细观

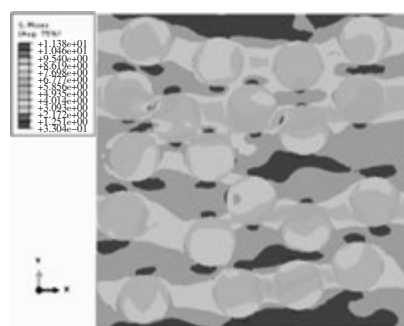
力学响应。

4 微观尺度力学响应分析

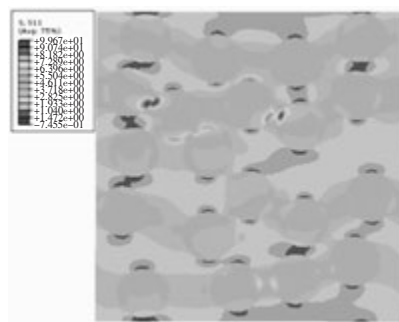
将不同的加载条件施加于 RVE, 以此获得材料在不同条件下的力学响应, 其中包括沿 x 轴横向拉伸、沿 x 轴横向压缩以及沿 xy 方向的横向剪切的情况。在图 3~5 中, S_{11} , S_{22} 分别为体积单元在 x 方向和 y 方向的应力分布; S_{12} 为体积单元在 xy 方向的剪切应力。

4.1 横向拉伸载荷作用

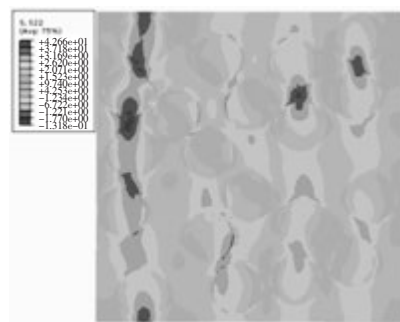
图 3 为代表性体积单元沿 x 轴横向拉伸力学响应。由图 3 可知, 高应力区总是位于界面处, 尤其是沿着加载方向纤维相互靠近的区域。纤维横截面的形状扭曲(变形)与代表性体积单元整体变



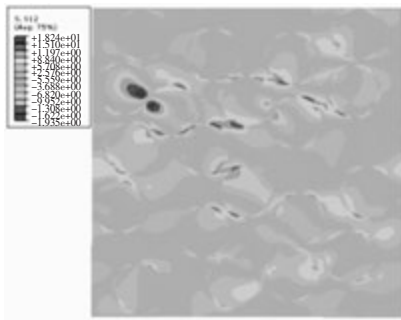
(a) Mises 应力分布



(b) x 方向应力分布



(c) y 方向应力分布



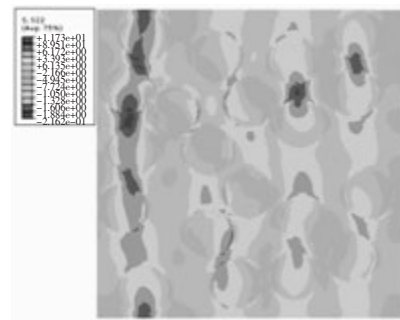
(d) xy 向剪切应力分布

图 3 代表性体积单元沿 x 轴横向拉伸力学响应
Fig.3 Transverse tensile mechanical response of RVE
in x direction

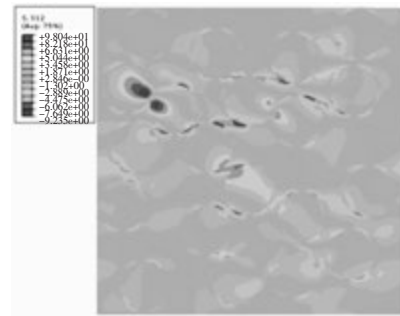
形的关联性较小,这是由于纤维比基体具有更高的刚度,所以变形总是考虑基体,尽管纤维中的应力比基体中的应力趋于更高。图 3(c)靠近左侧边界的区域形成了一长条带,这是由于纤维的随机分布而产生的易损伤区域,该区域应力值较小,随着拉伸载荷的逐渐增大,最终的纤维/基体界面脱粘和裂纹扩展将会在此区域形成。

4.2 横向压缩载荷作用

图 4 为代表性体积单元沿 x 轴横向压缩力学响应的情况。由图 4 可以看出,叶片复合材料能够承受较大的压缩载荷。



(c) y 方向应力分布



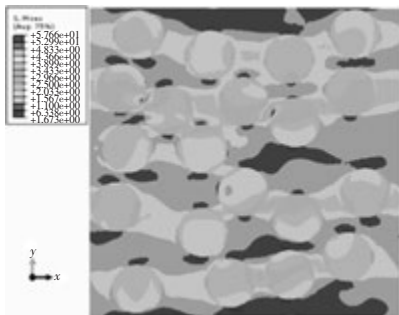
(d) xy 向剪切应力分布

图 4 代表性体积单元沿 x 轴横向压缩力学响应
Fig.4 Transverse compression mechanical response of RVE
in x direction

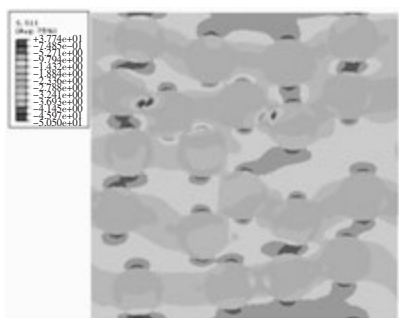
比较图 3(b)和图 4(b),体积单元受到沿 x 轴的压缩载荷作用时,高应力区也总是位于界面处,但是与拉伸载荷作用时不同的是,高应力区集中分布在垂直于加载方向纤维相互靠近的区域,并且基体承受着大部分载荷,基体中的应力值总是比纤维中的应力值高。在图 4(c)中靠近左侧边界出现应力值较小的长条带区域在受到横向压缩载荷作用时形成了高应力值的集中区,这也说明了此区域极易造成破坏。

4.3 剪切载荷作用

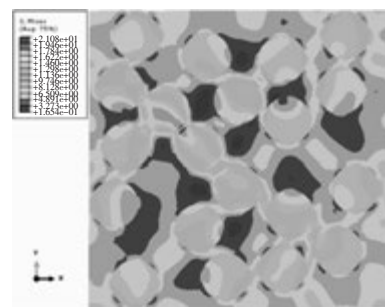
图 5 为代表性体积单元受 xy 方向剪切载荷



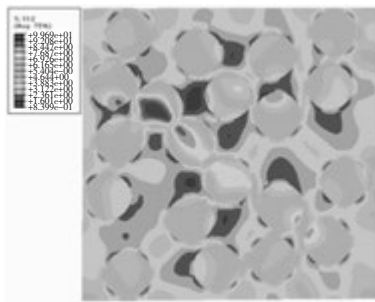
(a) Mises 应力分布



(b) x 方向应力分布



(a) Mises 应力分布



(b) xy 向剪切应力分布

图5 代表性体积单元受 xy 方向剪切载荷作用情况

Fig.5 Transverse shear mechanical response of RVE

作用的情况。

体积单元受到 xy 方向的剪切载荷作用时,沿剪切 45° 方向形成了相邻纤维间的高应力区。最终的纤维/基体开裂也会在此区域产生。

5 结论

本文运用 Abaqus 材料子程序 UMAT 建立的基体材料损伤模型,并结合 Abaqus 主程序计算得到叶片复合材料受拉伸、压缩、剪切载荷作用时的微观力学响应。通过反映叶片复合材料受载后的初始力学响应情况得到如下结论。

①初步了解了风机叶片材料的初始损伤情况,即体积单元中纤维和基体的界面处是高应力集中出现的部位,在纤维相邻的局部区域也会产生较大的应力。

②体积单元在受到载荷作用时纤维中的应力值比基体中的应力值更高,体积单元的变形也只考虑基体的变形。

参考文献:

- [1] 王艳飞,孙耀宁,孙文磊,等.纤维增强复合材料损伤行为及强度预测微观力学建模研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2014,(06):83-89.
- [1] Wang Yanfei, Sun Yaoning, Sun Wenlei, et al. Advances of study with micromechanical modeling on damage behavior and predic of strength of fiber reinforced composites [J]. Fiber Reinforced Plastics /Composites, 2014, (06): 83-89.
- [2] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报, 2007,(1):1-12.
- [2] Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Material Composite Sinica, 2007, (1): 1-12.
- [3] Aveston J, Cooper G A, Kelly A. Single and Multiple Fracture [M]. Surrey: IPC Science and Technology Press, 1971.
- [4] Marshall D B, Cox B N. Tensile properties of brittle matrix composites: influence of fiber strength [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1987, 35: 2607-2619.
- [5] Budiansky B, Hutchinson J W, Evans A G. Matrix fracture in fiber-reinforced ceramics [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1986, 34 (2): 167-189.
- [6] Wongsto A, Li S. Micromechanical FE analysis of UD fibre-reinforced composites with fibres distributed at random over the transverse cross-section[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36 (9): 1246-1266.
- [7] Mishnaevsky L, Brondsted P. Micromechanical modeling of damage and fracture of unidirectional fiber reinforced composites; A review [J]. Comput Mater Sci, 2009, 44(4): 1351-1359.
- [8] Qing H, Mishnaevsky L. Unidirectional high fiber content composites: Automatic 3D FE model generation and damage simulation[J]. Comput Mater Sci, 2009, 47 (2): 548-555.
- [9] 张小琦.纤维增强复合材料变形与损伤的微观力学分析[D].重庆:西南大学,2013.
- [9] Zhang Xiaoqi. Micromechanics analysis of fiber reinforced composite material deformation and damage[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [10] 王晓强.基于内聚力模型的复合材料拉伸性能微观有限元分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [10] Wang Xiaoqiang. Meso-finite element analysis of the tensile properties of composites based on cohesive model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [11] 张超,许希武,严雪.纺织复合材料微观力学分析的一般性周期性边界条件及其有限元实现 [J]. 航空学报, 2013,34(7):1636-1645.
- [11] Zhang Chao, Xu Xiwu, Yan Xue. General periodic boundary condition and their application to micromechanical finite element analysis of textile composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1636-1645.
- [12] Mahesh C, Govindarajulu K, Murthy V B. Homogenization of partial debond effect on the effective thermal conductivities of FRP composite using finite element analysis [J]. Composite Interfaces, 2015, 22 (1): 51-65.

- [13] Melro A R, Camanho P P, Pires F M A, et al. Micromechanical analysis of polymer composites reinforced by unidirectional fibres: Part I—constitutive modelling[J]. *Int J Solids Struct*, 2013, 50(11–12): 1897–1905.
- [14] Mishnaleyevsky L, Brondsted P. Micromechanisms of damage in unidirectional fiber reinforced composites: 3D computational analysis [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(7–8): 1036–1044.

Microscale analysis of wind turbine blades composites of the transverse mechanical response based UMAT

Sun Yaoning, Wang Yanfei, Zhu Zijian

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Use random fiber distribution representative volume element (RVE) is more in line with the real situation of the composite material, and its boundary conditions set by the force of the overall characteristics of the RVE. We can applying periodic boundary conditions quickly and efficiently by running the script. Otherwise we using Abaqus material subroutine UMAT to establish material damage modeling, and finite element numerical simulation was validated against damage modeling. And obtained the microscale mechanical response of blades composites in different loads condition.

Key words: UMAT; turbine blades composites; microscale; mechanical responses; transverse behavior