复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第5期 10月 2013年
Vol. 30 No. 5 October 2013

文章编号：1000-3851(2013)05-0166-08

三维六向编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测

卢子兴*，夏 彪，王成禹
（北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191）

摘 要： 基于三维六向编织复合材料的细观结构，假设第六向纱线的截面形状为菱形，建立了三维六向编织复合材料的渐进损伤有限元模型。采用 Linde 等提出的失效准则，引入周期性位移边界条件，对三维六向编织复合材料的纵向拉伸应力-应变行为进行了渐进损伤数值模拟，讨论了单胞模型在纵向拉伸载荷作用下的细观损伤起始、扩展和最终失效的演化过程，并预测了材料的拉伸强度。在此基础上，进一步研究了编织角、纤维体积分数和编织纱水平取向角等参数对材料纵向拉伸力学性能的影响规律。研究结果表明，三维六向编织复合材料的轴向纱线拉伸断裂是导致其破坏的最主要因素。所得数值结果与现有试验值吻合较好，验证了该模型的有效性，为更深入研究此类材料的力学性能奠定了基础。

关键词： 三维六向；编织复合材料；有限元；渐进损伤；强度
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Progressive damage simulation and strength prediction of three-dimensional and six-directional braided composites

LU Zixing*, XIA Biao, WANG Chengyu
(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the meso-structure of three-dimensional and six-directional braided composites and assuming that the cross-section of weft yarn on the sixth direction was diamond, a representative volume element (RVE)-based micromechanical damage model was presented to predict the damage propagation and strength of three-dimensional and six-directional braided composites. The stress-strain relation of three-dimensional and six-directional braided composites was simulated by using failure criteria proposed by Linde and the periodicity boundary condition. The progressive damage of three-dimensional and six-directional braided composites was studied subjected to longitudinal tensile loading, and ultimate strength of the sample was obtained. Furthermore, the changing characteristics of mechanical properties with the material parameters of braided composites were discussed. The results show that the main factor to break the three-dimensional and six-directional braided composites is longitudinal tensile breakage of axial yarns, and the FEM results are in a good agreement with experimental data, which confirms the effectiveness of the model and provides a basis for the analysis of mechanical properties.

Keywords: three-dimensional and six-directional; braided composites; FEM; progressive damage; strength

三维编织复合材料作为一种新型复合材料，从根本上克服了层合复合材料易分层的致命弱点，具有较高的层间强度和抗冲击损伤能力，在航空、航天等特殊领域具有广阔的应用前景[1-2]。三维六向(6D)编织复合材料是在三维五向(5D)编织复合材料编织结构基础上沿着与编织成型方向相垂直的横向加入了一组纱线，称之为纬纱。6D 编织材料不仅可以提高其层间强度和抗冲击性能，而且还能较好地改善其面内性能。值得注意的是，近年来很多学者都将研究重点转到三维编织复合材料损伤性能和强度预测研究方面。Macander 等[3]首先通过实验研究了三维编织物的强度和刚度；Shu 等[4]研究了二维三轴编织碳纤维复合材料的压缩力学性能；卢子兴等[5]较早基于一种经验性强度失效准则，对

收到初稿日期： 2012-09-24；**收到修改稿日期：** 2012-12-10；**网络出版时间：** 2013-01-18 11:49:54
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130118.1149.010.html
基金项目： 国家自然科学基金(11072015，11272030，10932001)
通讯作者： 卢子兴，教授，博士生导师，研究方向为泡沫材料力学及复合材料结构强度 E-mail：luzixing@buaa.edu.cn

三维四向(4D)编织复合材料的拉伸强度进行了预测，结果与试验值吻合较好；此外，文献[6]基于复合材料细观力学的桥联模型成功预测了4D材料的刚度和强度；Gu[7]基于对三维编织复合材料纱线轨迹及其预制件的细观结构，较好地预测了三维编织预制件在拉伸载荷下的应力-应变曲线；Zeng等[8]基于多相有限元“米”字形模型，计算得到了材料的非线性应力-应变关系；Dong等[9]基于均匀化理论，对三维编织复合材料的损伤扩展过程进行了分析研究，并考虑了角胞和面胞对材料损伤的影响；庞宝君[10]、Fang[11]等采用Murakami损伤理论，对三维编织复合材料损伤非线性本构行为进行了研究，得出损伤累积是导致材料最终失效的主要原因；张超等[12]采用考虑纱线相互挤压的八边形截面单胞模型，对三维编织复合材料的渐进损伤过程进行了有限元模拟，探讨了Hashin和Tsai-Wu两种失效准则作为判定纱线起始损伤条件的适用性问题；徐焜等[13]对6D材料进行了拉伸、压缩等实验，获得了材料的主要力学性能参数，研究了材料在不同载荷作用下的失效机制和破坏模式，但没有考虑编织工艺参数对材料力学性能的影响规律；最近，郭颖等[14]又对6D材料的拉伸性能进行了实验研究，提出了一些有参考价值的结论。综上所述，对于4D材料和5D材料的强度问题，国内外已发表不少相关研究文献，但对6D材料除了弹性性能的研究[15]外，对强度问题的理论研究还未见文献报道。因此，为促进6D材料的开发和应用，利用有限元数值模拟方法对这类材料的应力-应变行为和强度性能进行研究将具有重要意义。

本文作者基于三维6D编织复合材料的细观结构，采用Linde等[16]提出的失效准则，建立了三维6D编织复合材料的渐进损伤分析模型。利用该模型研究了6D编织材料的应力-应变行为，讨论了单胞模型在拉伸载荷作用下胞体的损伤及演化过程，获得了极限破坏强度，并研究了材料参数对其力学行为的影响规律，得到了一些有参考价值的结论。

1 组分材料失效准则及损伤演化

6D编织材料的胞体主要由纱线和树脂基体构成，而两种组分材料的力学性能差异又较大，故需要用细观力学方法分别对组分材料进行失效判定。

对于纱线材料，本文中采用文献[17]给出的Linde失效准则[16]，具体包含两类失效模式。

1.1 纱线的纵向纤维损伤失效

纱线的纵向损伤失效准则为

$$f_{\mathrm{f}}=\sqrt{\frac{\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}}{\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,c}}}(\varepsilon_{11})^2+\left(\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}-\frac{(\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}})^2}{\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,c}}}\right)\varepsilon_{11}}>\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}} \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,c}}=\sigma_{\mathrm{L}}^{\mathrm{f,c}}/C_{11}$，$\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}=\sigma_{\mathrm{L}}^{\mathrm{f,t}}/C_{11}$，$\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,c}}$和$\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}$分别为纱线中沿纤维方向的压缩失效应变和拉伸失效应变；$\sigma_{\mathrm{L}}^{\mathrm{f,c}}$和$\sigma_{\mathrm{L}}^{\mathrm{f,t}}$分别为相应的失效强度；$C_{11}$为纱线未损伤状态的刚度系数。这里，利用损伤因子$D_{\mathrm{f}}$来描述纤维的损伤过程，即

$$D_{\mathrm{f}}=1-\frac{\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}}{f_{\mathrm{f}}}\exp\left[-C_{11}\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}}(f_{\mathrm{f}}-\varepsilon_{11}^{\mathrm{f,t}})L^{\mathrm{c}}/G_{\mathrm{f}}\right] \tag{2}$$

式中：G_{f}为纤维的断裂能密度；L^{c}为材料单元的特征长度。

1.2 纱线的横向纤维损伤失效

纱线的横向损伤失效准则为

$$f_{\mathrm{m}}=\sqrt{\frac{\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}}{\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,c}}}(\varepsilon_{22})^2+\left(\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}-\frac{(\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}})^2}{\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,c}}}\right)\varepsilon_{22}+\left(\frac{\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}}{\varepsilon_{12}^{\mathrm{f}}}\right)^2(\varepsilon_{12})^2}>\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}} \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,c}}=\sigma_{\mathrm{T}}^{\mathrm{f,c}}/C_{22}$，$\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}=\sigma_{\mathrm{T}}^{\mathrm{f,t}}/C_{22}$，$\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,c}}$和$\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}$分别为垂直于纱线中纤维方向的压缩失效应变和拉伸失效应变；$\sigma_{\mathrm{T}}^{\mathrm{f,c}}$和$\sigma_{\mathrm{T}}^{\mathrm{f,t}}$分别为相应的失效强度；$C_{22}$和$C_{44}$为纱线未损伤状态的刚度系数；$\varepsilon_{12}^{\mathrm{f}}=\tau_{\mathrm{LT}}^{\mathrm{f}}/C_{44}$，$\varepsilon_{12}^{\mathrm{f}}$为剪切失效应变；$\tau_{\mathrm{LT}}^{\mathrm{f}}$为剪切失效强度。

同样地，可利用损伤因子D_{m}来描述纱线中基体的损伤过程，即

$$D_{\mathrm{m}}=1-\frac{\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}}{f_{\mathrm{m}}}\exp\left[-C_{22}\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}(f_{\mathrm{m}}-\varepsilon_{22}^{\mathrm{f,t}}L^{\mathrm{c}}/G_{\mathrm{m}})\right] \tag{4}$$

式中，G_{m}为基体的断裂能密度。

根据上述损伤失效准则，当组分材料出现损伤时，则通过D_{f}和D_{m}将纱线的等效刚度矩阵削弱成式(5)。其中的C_{11}、C_{12}、C_{13}、C_{22}、C_{23}、C_{33}、C_{44}、C_{55}和C_{66}均为纱线未出现损伤时的刚度系数。

对于树脂基体，采用Von-Misses应力准则对其损伤过程进行判断。即当纱线外部基体的受拉单元的Von-Misses应力超过材料的拉伸强度，或者受压单元的Von-Misses应力超过材料的压缩强度时，将对应单元的刚度置零(为保证计算收敛性，刚度只能降低至接近零的一个较小正值，本文中为1 Pa)。

$$C_D = \begin{bmatrix} (1-D_f)C_{11} & (1-D_f)(1-D_m)C_{12} & (1-D_f)C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & (1-D_m)C_{22} & (1-D_m)C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & (1-D_f)(1-D_m)C_{44} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \tag{5}$$

2　细观胞体有限元模型

2.1　单胞几何模型

6D 编织结构是在 5D 编织结构宽度方向上加入不参与编织的第六向纱(即纬纱)而形成的一种整体编织结构。5D 和 6D 编织结构内部单胞的细观结构模型如图 1 所示。

由于 6D 编织材料的细观结构比较复杂，且表面及棱角部分对横截面较大(内胞比例较高)的拉伸试件的力学性能影响较小[5-6]，故以内部单胞来表征其宏观的力学性能，图 2 给出了 6D 编织材料实体纱线单胞模型(其中，$\alpha=30°$，$V_f=45\%$，$\varphi=45°$)，单胞的外形尺寸为 $w\times t\times h$。根据编织纱和轴纱在编织过程中的受力关系，可以假设编织纱的截面形状为六边形，轴纱截面形状为菱形[18]，如图 3(a)、3(b)所示；根据纬纱与编织纱和轴纱之间的挤压关系，如图 4 所示[19]，本文中假设纬纱的截面形状也为菱形(如图3(c)所示)。由编织纱、轴纱和纬纱的空间位置关系及编织工艺参数[15]，可得单胞的几何参数关系如下：

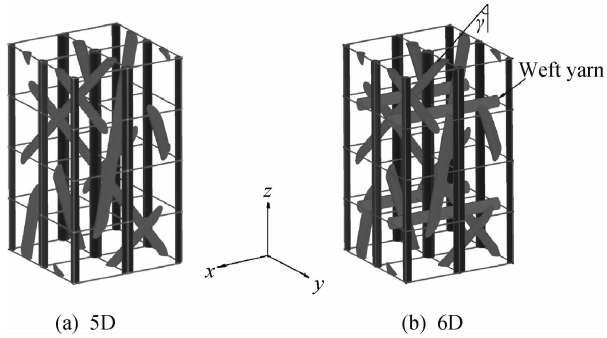

图 1　三维编织复合材料细观结构模型

Fig. 1　Micro-structure model of three dimensional braided composites

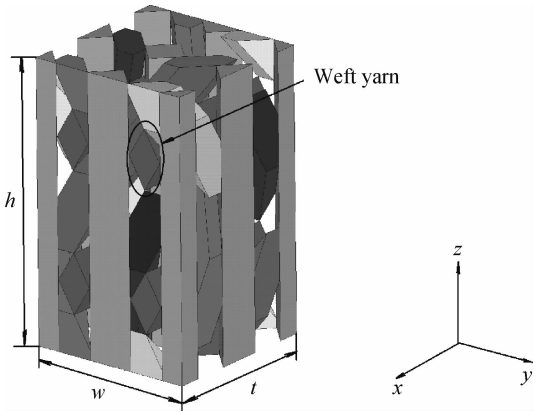

图 2　三维六向(6D)编织复合材料单胞模型

Fig. 2　Unit cell model of three-dimensional and six-directional(6D) braided composites

编织角 α 与内部编织角 γ 之间的关系为

$$\tan\alpha=\sin\varphi\tan\gamma \tag{6}$$

花节高度 h 与单胞的宽度 w、厚度 t 的关系为

$$h=\frac{w}{\tan\gamma\cos\varphi}=\frac{t}{\tan\gamma\sin\varphi} \tag{7}$$

其它主要结构参数的具体表达式为

$$s=\frac{w}{2}\tan\varphi-2n \tag{8}$$

$$l=\frac{w}{2}-2n\cot\varphi \tag{9}$$

$$n=\left[\frac{\sqrt{(2\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi}+1)^2+3\left(1+4\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi}+\frac{2}{\cos\gamma}\right)}}{4\left(1+4\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi}+\frac{2}{\cos\gamma}\right)\frac{1}{\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi}}}-\frac{(2\tan\gamma\cos\varphi+\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi})}{4\left(1+4\sqrt{\tan\gamma\cos\varphi}+\frac{2}{\cos\gamma}\right)}\right]w\tan\varphi \tag{10}$$

$$m=\frac{2n}{\tan\gamma\sin\varphi} \tag{11}$$

$$a=b=\frac{\sqrt{16+w^4\tan^2\varphi}}{8w} \tag{12}$$

$$\beta=90° \tag{13}$$

$$\theta=2\varphi=2\psi \tag{14}$$

$$V_f=\frac{2\left[1+\left(1+\frac{R}{\cos\gamma}\right)\frac{\cot\gamma}{\cos\varphi}\right]n^2}{w^2\tan^2\varphi}\kappa_f \tag{15}$$

其中：R 为编织纱的横截面面积与轴纱的横截面面积的比值；φ 为编织纱的水平取向角；κ_f 为纱线填充因子；V_f 为纤维的体积分数。

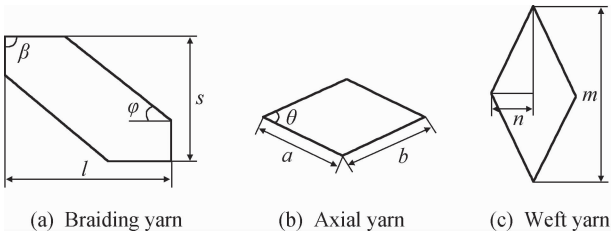

图 3　纱线的横截面图

Fig. 3　Cross-section shape of yarn

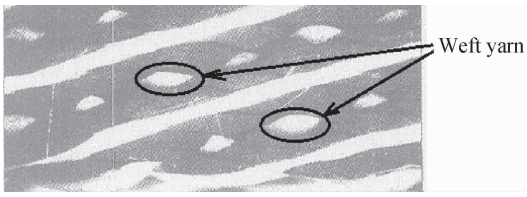

图 4　6D 编织复合材料在沿编织角方向的纵截面图[19]

Fig. 4　Longitudinal section of 6D braided composites cutting at braiding angle[19]

2.2　周期性边界条件与网格划分

为了保证单胞边界上的位移满足周期性和连续性，采用 Xia 等[20]提出的针对具有成对平行边界面胞体的周期性位移边界条件，其适用性的证明可参见文献[21]。

在对胞体进行网格划分时，必须严格保证相对平行面上的网格节点一一对应，具体的实现方法见文献[22]详述。

3　分析计算与讨论

3.1　模型验证

为了验证模型的有效性，采用文献[14]提供的 6D 材料拉伸试验数据作为验证算例。具体试样的相关参数如表 1 所示，表 2 则给出了其组分材料的性能参数。

图 5 中给出了试件 6DT1 用 FEM 预测的拉伸应力-应变曲线与试验曲线的对比。可以看出，当拉伸应变小于 0.8%时，FEM 预测的应力-应变曲线呈线性变化，而当拉伸应变大于 0.8%时，对应的应力-应变曲线的变化趋势则表现出一定的非线性，这主要是由于局部损伤的出现对宏观应力-应变曲线产生了影响。此外，试件拉伸极限强度预测值为 657 MPa，而文献[14]中给出的试验值为 631.8 MPa，拉伸模量预测值为 46.44 GPa，而对应的试验值为 45.1 GPa，对比 FEM 预测值和试验值，可知本文中所建立的渐进损伤模型和有限元胞体模型是有效、合理的。

表 1　6D 编织复合材料试样相关参数[14]

Table 1　Related parameters of 6D braided composites samples[14]

Specimen	Size/mm^3	Braiding angle/(°)	V_f /%
6DT1	250×25×3	23.94	45.40

表 2　碳纤维、树脂基体的性能参数[23]

Table 2　Mechanical properties of carbon fiber and resin matrix[23]

	Modulus/GPa				μ_{12}	Strength/MPa	
	E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{23}		X_T	X_C
Fiber	230	40	24	14.3	0.26	4900	2470
Matrix	4.5	4.5			0.34	80	241

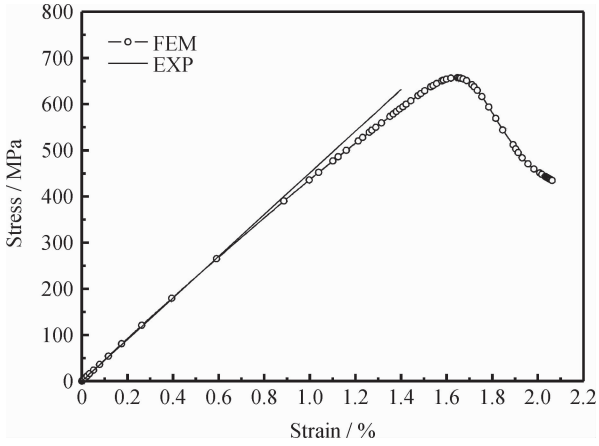

图 5　试件 6DT1 纵向拉伸应力-应变曲线

Fig. 5　Longitudinal tensile stress - strain curves of specimen 6DT1

3.2　损伤演化分析

纱线作为 6D 编织材料的增强体，其损伤演化行为直接影响着材料的力学性能。图 6 和图 7 分别给出了数值模拟拉伸试件 6DT1 所对应的纱线横向基体损伤和纵向纤维损伤的主要扩展过程。

根据图 6 可知，由于纱线横向拉伸强度和剪切强度均较低，随着加载位移的增加，当 $\bar{\varepsilon}_z$ = 0.171%时，6D 编织材料中的纬纱首先因受到轴纱和编织纱的横向挤压而发生基体法向压缩开裂；进而，编织纱和轴纱内部也逐渐开始出现横向损伤，导致材料的整体刚度下降，应力-应变曲线呈现非线性；当 $\bar{\varepsilon}_z$ = 1.647%时，材料的纵向拉伸应力-应变曲线达到了最大值，即达到了材料的极限破坏强度，此时，纬纱中的基体已经全部开裂，并且编织

纱和轴纱也出现大量基体损伤；随着加载位移的继续增加，当拉伸应变 $\bar{\varepsilon}_z=2.054\%$ 时，基体损伤扩展至全部纱线，材料出现失效。

纱线纵向纤维损伤的产生要明显晚于横向基体损伤。如图 7 所示，当拉伸应变 $\bar{\varepsilon}_z=0.171\%$ 时，纱线并未发生损伤行为；当加载位移继续增加，在纬纱和轴纱相接触的轴纱表面区域，开始出现纵向纤维拉伸断裂损伤，并迅速沿着纱线的横向扩展；随着纤维断裂损伤的迅速扩展，直到达到材料的极限破坏强度，即应变 $\bar{\varepsilon}_z=1.647\%$ 时，纱线中出现了较多的损伤单元，并继续发展，导致纱线失效单元的迅速增多；当拉伸应变 $\bar{\varepsilon}_z=2.054\%$ 时，轴纱中出现大量的失效单元并发生断裂，使得 6D 编织材料的模量迅速降低，最终失去纵向承载能力，发生脆性破坏。因此，相比纱线横向损伤，轴向纱线的拉伸断裂是导致三维六向编织复合材料破坏的最主要因素。

对于纱线外部的富树脂区，如图 8 所示，当拉伸应变 $\bar{\varepsilon}_z=0.171\%$ 时，并未出现单元损伤行为；随加载位移的增加，纱线内部发生拉剪损伤，引发纱线交织区域的外部基体开裂，并逐步地扩展；当应变 $\bar{\varepsilon}_z=1.647\%$ 时，基体损伤累积，失效单元迅速增多，并沿着纱线接触表面迅速扩展；当拉伸应

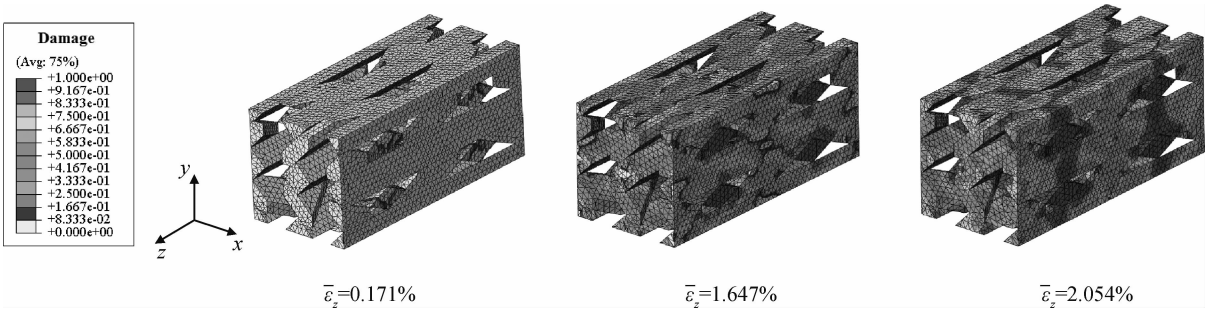

图 6　试件 6DT1 纱线横向损伤扩展过程

Fig. 6　Progressive damage process of yarns of specimen 6DT1 in transverse direction

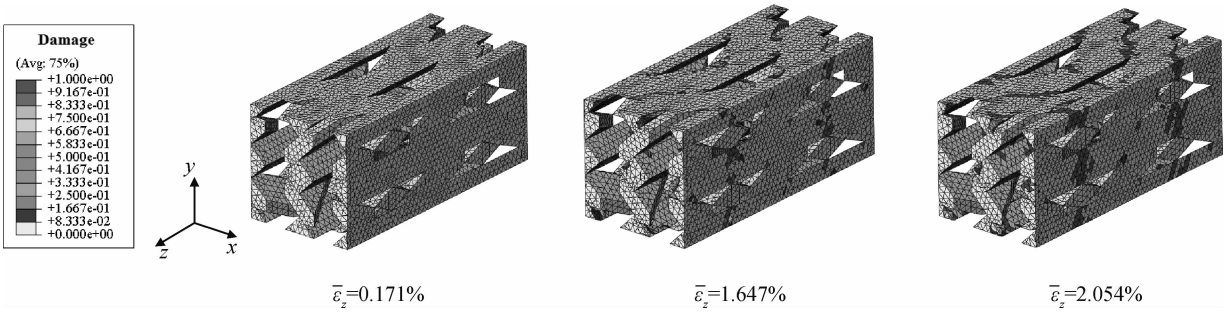

图 7　试件 6DT1 纱线纵向纤维损伤扩展过程

Fig. 7　Progressive damage process of yarns of specimen 6DT1 in longitudinal direction

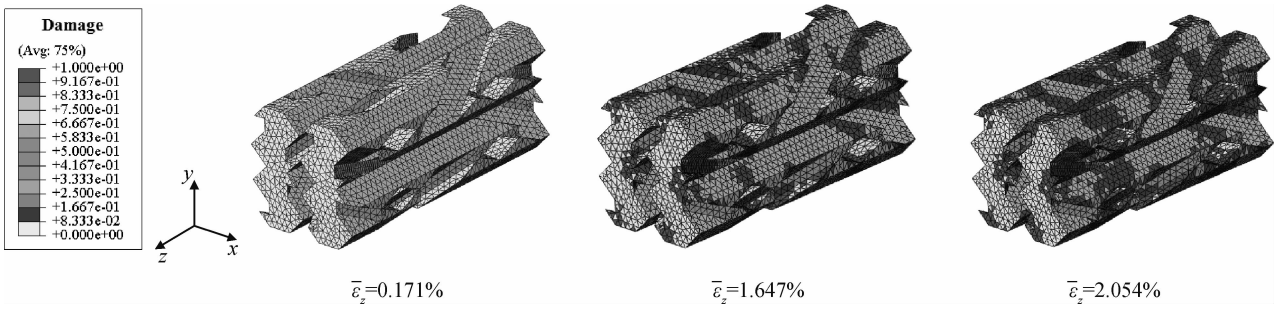

图 8　试件 6DT1 富树脂区基体失效损伤扩展过程

Fig. 8　Progressive damage process of matrix pocket failure of specimen 6DT1

变 $\bar{\varepsilon}_z=2.054\%$ 时，基体中出现大量的失效单元，材料的力学性能进一步下降。但总体而言，相比纱线横向基体损伤和纵向纤维损伤，富树脂区单元的损伤对材料的纵向拉伸性能影响较小。

3.3 材料参数的讨论

图 9～图 11 分别给出了不同材料参数对 6D 编织复合材料纵向拉伸应力-应变曲线及强度的影响规律。

图 9(a)给出了当 $\alpha=25°$ 时，不同纤维体积分数 V_f 的 6D 编织材料所对应的纵向拉伸应力-应变曲线，结合图 9(b)预测强度随 V_f 的变化趋势可知，当 α 一定时，随 V_f 的增加，材料的拉伸模量和纵向拉伸强度均逐渐增大。从图 9(a)中可以看出，随 V_f 的增加，6D 编织材料对应的失效应变逐渐减小。在图 9(b)中，当 $V_f<40\%$ 时，随 V_f 增加，6D 材料的极限破坏强度呈线性增加趋势，而 $V_f>40\%$ 时，极限破坏强度的增加幅度有所减小。

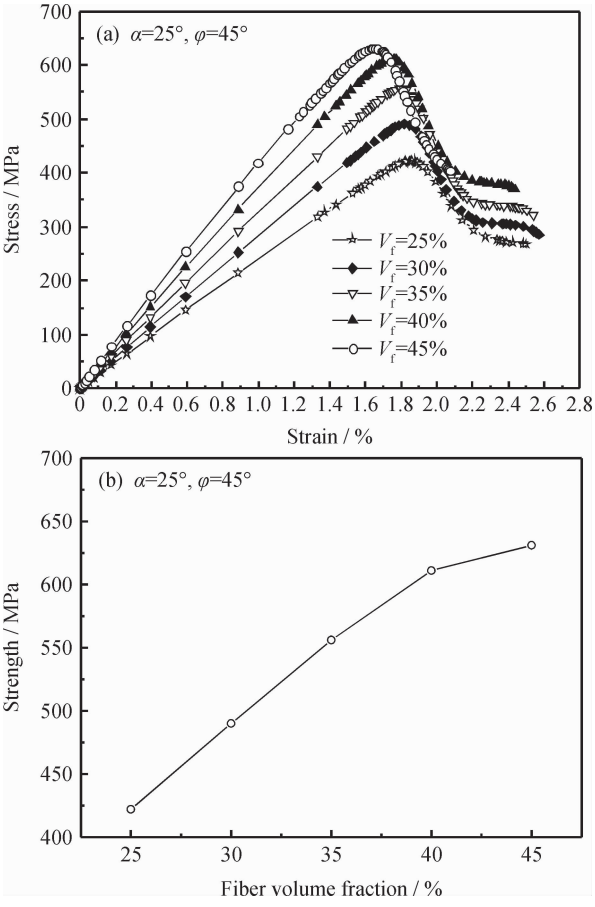

图 9 纤维体积分数对 6D 编织复合材料纵向拉伸应力-应变曲线及强度的影响

Fig. 9 Effect of fiber volume fraction on longitudinal tensile stress - strain curve and strength of 6D braided composites

图 10(a)给出了当 V_f 一定时，不同的 6D 编织材料对应的纵向拉伸应力-应变曲线，结合图 10(b)可知，随 α 的增加，材料的拉伸模量和纵向拉伸强度 σ_z 均逐渐减小。对于小编织角材料，其对应的应力-应变曲线在材料整体破坏前，均呈现线性关系，一旦材料破坏后，曲线迅速下降，材料失去承载能力；而对于大编织角材料，在材料整体破坏前，应力-应变曲线呈现一定的非线性行为，主要是因为材料的局部损伤对其整体性能产生较大影响，损伤的不断积累，导致材料最终破坏，失去承载能力。从图 10(b)可知，当 $\alpha<25°$ 时，随 α 的增加，材料轴向拉伸强度的减小幅度较大，而当 $\alpha>25°$ 时，其轴向拉伸强度的减小幅度逐渐降低，说明随着 α 的增加，单胞内纵向上的纤维比例逐渐减小，当 α 较大时，轴纱起着主要的承载作用。

由图 11 可知，在一定的编织纱水平取向角 φ 的取值范围内，当 V_f 和 α 一定时，随 φ 的增加，6D

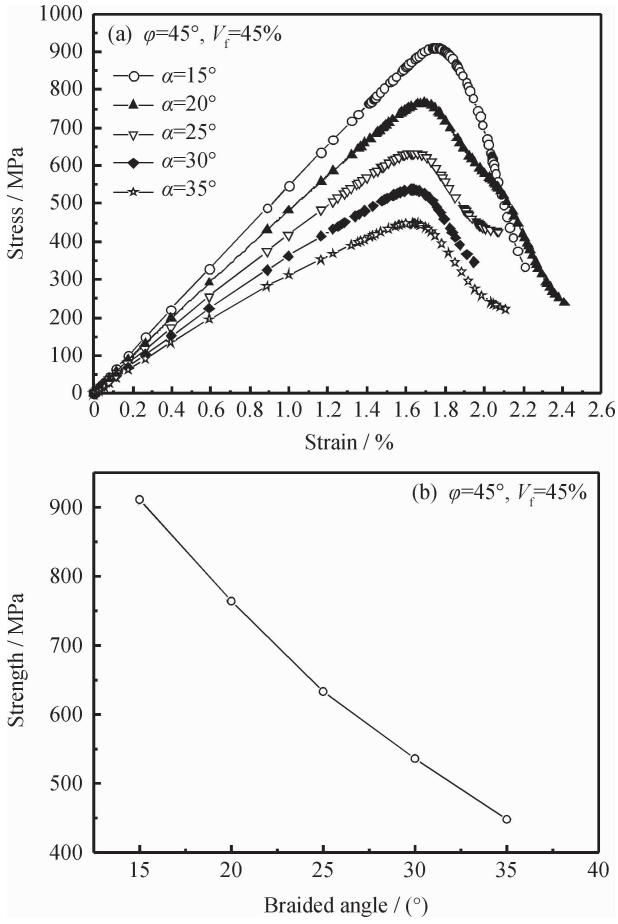

图 10 编织角对 6D 编织复合材料纵向拉伸应力-应变曲线及强度的影响

Fig. 10 Effect of braiding angle on longitudinal tensile stress - strain curve and strength of 6D braided composites

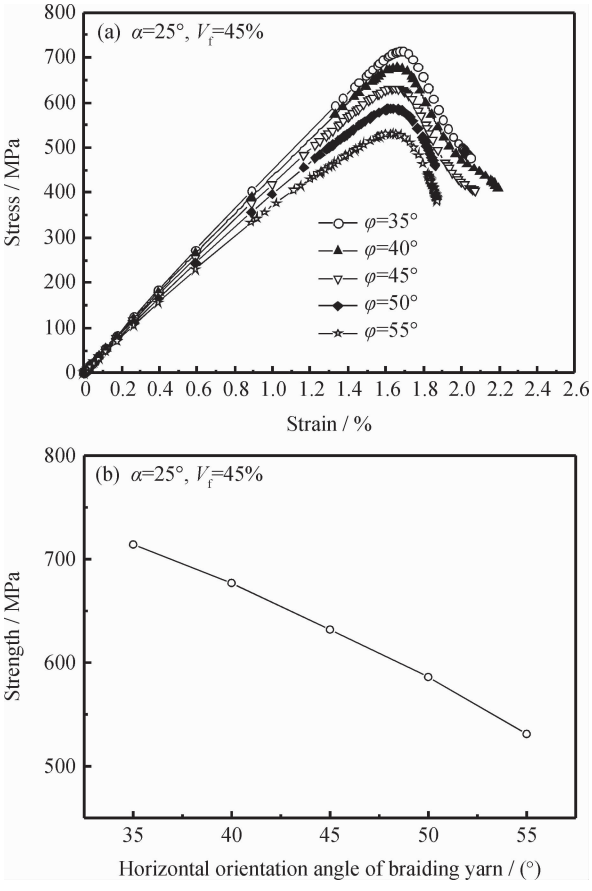

图 11　编织纱的水平取向角对 6D 编织复合材料纵向拉伸应力-应变曲线及强度的影响

Fig. 11　Effect of horizontal orientation angle of braiding yarn on longitudinal tensile stress - strain curve and strength of 6D braided composites

材料的拉伸模量 E_z 和纵向拉伸强度 σ_z 均减小，这主要是因为随着 φ 的增加，胞体横向上的纤维比例逐渐增大，而在纵向上的纤维比例相应地减小。当 φ 较小时，随 φ 的增加，材料的纵向拉伸应力-应变曲线呈线性变化趋势，而当 φ 较大时，对应的应力-应变曲线表现出一定的非线性。从图 11(b)可以看出，φ 增加时，6D 编织材料的纵向拉伸强度近似呈线性减小的趋势。但当 $\varphi<45°$时，强度的降低幅度较小，而当 $\varphi>45°$时，对应强度的降低幅度有所增加。因此，6D 编织材料由于纬纱的加入，使其面内性能有较大的提高[14]，在特殊的应用领域，可以通过适当改变 φ 的取值改善 6D 编织材料的整体力学性能。

4　结　论

采用 Linde 失效准则，对三维六向(6D)编织复合材料的渐进损伤行为进行了模拟，预测了材料的极限破坏强度。此外，通过具体的实验算例，验证了该模型的有效性，并讨论了材料参数对其力学性能的影响规律。

(1) 轴向纱线拉伸断裂是导致 6D 编织复合材料破坏的最主要因素。

(2) 纱线横向基体损伤的产生要早于纵向纤维损伤，并导致应力-应变曲线呈现出非线性特征。

(3) 在编织结构一定时，随着纤维体积分数的增加，6D 编织材料的纵向拉伸模量和拉伸强度逐渐增大。

(4) 编织角对 6D 编织材料的纵向拉伸性能具有非常明显的影响。小编织角材料具有较高的强度，最终呈脆性破坏；而大编织角材料对应的应力-应变曲线呈现出一定的非线性特征，材料的延展性较好。在编织结构一定时，随着编织角的增大，材料的纵向模量和极限破坏强度均逐渐减小。

(5) 当纤维体积分数和编织角不变，编织纱水平取向角在一定取值范围时，6D 编织材料的纵向拉伸强度随编织纱水平取向角的增加而减小。

参考文献：

[1] Chamis C C. Mechanics of composites materials: Past, present and future [J]. Journal of Composites Technology and Research, 1989, 11(1): 3-14.

[2] 卢子兴，杨振宇，李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展 [J]. 复合材料学报，2004，21(2)：1-7.
Lu Zixing, Yang Zhenyu, Li Zhongping. Development of investigation into mechanical behavior of three - dimensional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 1-7.

[3] Mouritza A P, Bannisterb M K, Falzonb P J, et al. Review of applications for advanced three - dimensional fiber textile composites [J]. Composites: Part A, 1999, 30(12): 1445-1461.

[4] Quek S C, Waas A, Shahwan K W, et al. Compressive response and failure of braided textile composites Ⅰ: Experiments [J]. International Journal of Nonlinear Mechanics, 2004, 39: 635-648.

[5] 卢子兴，刘振国，麦汉超，等. 三维编织复合材料强度的数值预报 [J]. 北京航空航天大学学报，2002，28(5)：563-565.
Lu Zixing, Liu Zhenguo, Mai Hanchao, et al. Numerical prediction of strength for 3D braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 563-565.

[6] 李典森，卢子兴，卢文书. 三维四向编织复合材料刚度和强度的理论预测 [J]. 应用数学和力学，2008，29(2)：149-156.

Li Diansen，Lu Zixing，Lu Wenshu. Theoretical prediction of the stiffness and strength of three - dimensional and four - directional braided composites [J]. Applied Mathematics and Mechanics，2008，29(2)：149-156.

[7] Gu Bohong. Prediction of the uniaxial tensile curve of 4-step 3 - dimensional braided perform [J]. Composite Structures，2004，64(2)：235-241.

[8] Zeng T，Fang D N，Li M，et al. Predicting the nonlinear response and failure of 3D braided composites [J]. Materials Letters，2004，58(26)：3237-3241.

[9] Dong J W，Feng M L. Asymptotic expansion homogenization for simulating progressive damage of 3D braided composites [J]. Composite Structures，2010，92(4)：873-882.

[10] 庞宝君，杜善义，韩杰才，等. 三维多向编织复合材料非线性本构行为的细观数值模拟 [J]. 复合材料学报，2000，17(1)：98-102.
Pang Baojun，Du Shanyi，Han Jiecai，et al. Nonlinear behavior of the constitutive simulation of mesoscopic computational mechanics for three - dimensional multi - directional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2000，17(1)：98-102.

[11] Fang G D，Liang J，Wang B L. Progressive damage and nonlinear analysis of 3D four - directional braided composites under unidirectional tension [J]. Composite Structures，2009，89(1)：126-133.

[12] 张　超，许希武，毛春见. 三维编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测 [J]. 复合材料学报，2011，28(2)：222-230.
Zhang Chao，Xu Xiwu，Mao Chunjian. Progressive damage simulation and strength prediction of 3D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(2)：222-230.

[13] 徐　焜，许希武，汪　海. 三维六向编织复合材料力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报，2005，22(6)：144-149.
Xu Kun，Xu Xiwu，Wang Hai. Experimental investigation of the mechanical properties of 3D 6 - directional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(6)：144-149.

[14] 郭　颖，吴林志，杨银环，等. 三维六向编织复合材料拉伸性能的实验研究 [J]. 宇航学报，2012，33(5)：669-674.
Guo Ying，Wu Linzhi，Yang Yinhuan，et al. Experimental investigation on on tensile mechanical properties of 3D six - directional braided composite [J]. Journal of Astronautics，2012，33(5)：669-674.

[15] 李典森，卢子兴，陈　利，等. 三维六向编织复合材料弹性性能理论预测 [J]. 复合材料学报，2006，23(4)：133-141.
Li Diansen，Lu Zixing，Chen Li，et al. Theoretical prediction of the elastic properties for three - dimensional and six - directional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2006，23(4)：133-141.

[16] Linde P，Pleitner J，Boer H D，et al. Modelling and simulation of fiber metal laminates [C]//ABAQUS User's Conference. Boston，Massachusetts：[s. n]，2004：421-439.

[17] 卢子兴，徐　强，王伯平，等. 含缺陷平纹机织复合材料拉伸力学行为数值模拟 [J]. 复合材料学报，2011，28(6)：200-207.
Lu Zixing，Xu Qiang，Wang Boping，et al. Numerical simulation of plain weave composites with defects under unidirectional tension [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(6)：200-207.

[18] 李嘉禄，刘　谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究 [J]. 复合材料学报，2001，18(2)：9-13.
Li Jialu，Liu Qian. Study on fiber tows cross-sect ion in 3-D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2001，18(2)：9-13.

[19] 刘景艳，陈　利. 三维六向编织预成型件中纱线的交织结构 [J]. 天津工业大学学报，2006，25(6)：5-8.
Liu Jingyan，Chen Li. Microstructure of 3D six - directional braided preforms [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University，2006，25(6)：5-8.

[20] Xia Z H，Zhang Y F，Fernand E. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications [J]. International Journal of Solid & Structure，2003，40(8)：1907-1921.

[21] Xia Zihui，Zhou Chuwei，Yong Qiaoling，et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro - mechanical analysis of composites [J]. International Journal of Solid & Structure，2006，43(2)：266-278.

[22] 夏　彪，卢子兴. 三维编织复合材料热物理性能的有限元分析 [J]. 航空学报，2011，32(6)：1040-1049.
Xia Biao，Lu Zixing. Finite element analysis on thermo - physical properties of 3D braided composites [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2011，32(6)：1040-1049.

[23] 李东风，王浩静，贺　福，等. T300 和 T700 炭纤维的结构与性能 [J]. 新型炭材料，2007，22(1)：59-64.
Li Dongfeng，Wang Haojing，He Fu，et al. Structure and properties of T300 and T700 carbon fibers [J]. New Carbon Materials，2007，22(1)：59-64.