复 合 材 料 学 报 第22 卷 第5 期 10 月 2005 年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 5 October 2005

文章编号: 1000-3851(2005) 05-0141-06

UHMWPE/ HDPE 层合板拉伸损伤扩展的有限元数值模拟

庄兴民, 晏 雄*
(东华大学 纺织学院, 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘 要: 为了优化设计PE/ PE 层合板复合材料和准确评价其性能, 必须深入地研究该类材料的损伤破坏机理, 进而揭示其损伤扩展规律, 预测因损伤的存在对材料刚度、强度等宏观性能的影响。基于拟三维模型的概念, 提出了适合于数值模拟PE/ PE 层合板复合材料力学行为的修正模型。应用此有限元数值模型, 对3 种准各向同性UHMWPE/ HDPE 层合板在拉伸载荷条件下的损伤及损伤扩展进行了模拟, 对这些材料的破坏机理进行了探讨, 并预测了它们的强度。通过试验, 可知应用上述模型进行数值模拟所获得的结果与试验数据是吻合的。证明了修正后的有限元数值模型的有效性。

关键词: PE/ PE 层合板; 损伤扩展; 强度预测; 拟三维模型; 有限元
中图分类号: TB 330. 1 **文献标识码**: A

FINITE ELEMENT NUMERICAL SIMULATION OF TENSILE DAMAGE PROPAGATION IN UHMWPE/ HDPE LAMINATED COMPOSITES

ZHUANG Xingmin, YAN Xiong*
(The Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education,
College of Textiles, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: In order to optimize the designs and evaluate exactly the performances of PE/ PE laminated composites, it is necessary to research the damage mechanisms of these materials, then to indicate the rules of the damage propagation, and to predict the effects on the various performances such as stiffness, strength and so on with the damage developing. A modified numerical model to simulate the mechanical behavior of PE/ PE laminated composites was proposed based on the quasi-3-dimensional model concept. The damage propagation of three types of quasi-isotropic UHMWPE/ HDPE laminated composites subjected to a tensile load was investigated by using the afore-mentioned model. The damage mechanism was analyzed and the strength was predicted for these materials. The experiments were done to verify the theoretical results. The results were consistent with those of the finite element numerical simulation. The validity of the modified numerical model is verified.

Keywords: UHMWPE/ HDPE laminated composites; damage propagation; strength prediction; quasi-3-dimensional model; finite element

超高分子量聚乙烯(UHMWPE) 纤维作为复合材料的增强体组分增加复合材料的刚性和强度及它和树脂基体之间的界面粘结强度对复合材料力学性能起着关键的作用[1~3]。由于聚乙烯是一种非极性材料, 为了提高复合材料界面强度, 选择烯烃纤维和相同种类基体制成复合材料, 使复合材料界面强度有很大提高[4,5]。强度是复合材料结构设计中最重要的特征指标。由于纤维增强复合材料损伤、破坏是由基体开裂、纤维和基体界面的脱粘、纤维断裂、层间分层等方式相互关联、综合而成的, 对一般为混合模式的实际破坏过程, 试验具体把握起来较困难。随着现代计算机性能不断提高, 以有限元法等为代表的数值分析方法应用很广泛, 使对复合材料力学行为的多种信息进行数值模拟和量化成为

收稿日期: 2004-10-08; 收修改稿日期: 2005-02-25
通讯作者: 晏 雄, 教授, 博士生导师, 主要从事纺织复合材料结构和力学等的研究 E-mail: yaxi@dhu.edu.cn

可能。然而迄今为止，作者关于系统研究PE/PE复合材料层合板的破坏机理和预测其强度问题等的报道尚不多见。

本文作者应用一种拟三维模型，数值模拟PE/PE复合材料层合板在拉伸载荷作用下的力学行为，研究其拉伸破坏机理和预测强度等。通过试验，验证数值模拟结果与试验数据这两者之间的一致性。

1　实　验

制备了3种准各向同性UHMWPE/HDPE层合板，即[0/90/45/-45]$_s$(A型)、[0/45/-45/90]$_s$(B型)和[45/-45/0/90]$_s$(C型)。热压叠层所用单层板的厚度相等为0.125 mm，所用材料基本性能见表1所示。按国家标准“定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法”的要求，切割UHMWPE/HDPE单层板0°和90°拉伸试件，供测定纵向强度F_L、横向强度F_T等参数使用。平面剪切强度G_{LT}用最优偏轴拉伸试验方法测定。试验在SANS电子万能试验机(天水三思新技术有限公司)上进行。该机有自动记录装置，连续加载。测得单层板纤维体积含量V_f为34%。

表1　UHMWPE纤维和HDPE树脂的性能

Table 1　Properties of UHMWPE fiber and HDPE resin

	密度 /(g·cm^{-3})	细度 /dtex	拉伸强度 /MPa	伸长率 /%	拉伸模量 /GPa	熔点 /℃
PE纤维	0.97	6	3013	3.3	91.32	141.0
HDPE树脂	0.95		23	9.49	0.74	128.3

2　修正的拟三维数值模型及其应用

2.1　修正的拟三维模型

在研究材料的强度问题时，材料的不均匀性、不连续性和各向异性是不应该忽视的。在研究解决复合材料力学问题中，用于模拟材料力学行为的传统数值模型的共同特点是假设层合板复合材料为匀质体。针对所研究具体问题的性质，若进入纤维、基体和界面这个较高层次来解决，则有利于对强度问题的本质和破坏规律的认识。因此，一种不同于上述传统模型的数值模型的要点聚焦于如何考虑复合材料的不均匀性。在探讨解决上述问题的过程中，Nishiwaki与其同事提出了一种拟三维模型[6]，此模型把层合板各单层考虑成不均匀体。利用此模型可在短时间内精度良好地模拟碳/环氧纤维增强复合材料层合板拉伸[7,8]等多种力学行为和预测复合材料层合板强度，获得仅在实验中不能够取得的多种重要信息。经试验验证该模型是有效的。应用此拟三维模型可在同一时间内分别模拟层合板不同破坏现象，如横向开裂、层间分层等，计算时间比传统三维有限元数值模拟短得多。这是因为拟三维模型几乎不需考虑有限元单元的长宽比[6,7]。在拟三维模型中，Nishiwaki与其同事假设每一个纤维区包含的纤维按六角形阵列排布，将纤维体积含量V_f为0.907的纤维区用正交各向异性壳单元建立模型。若应用该拟三维模型预测PE/PE复合材料层合板的力学行为，则此模型的纤维区部分假设有值得改进之处。因为PE/PE层合板由热塑性纤维增强热塑性树脂基体构成，其组分均为非极性材料，不同于脆性纤维增强热固性树脂基体层合板如碳/环氧层合板。因此，基于拟三维模型的概念，我们提出了一个修正的适合于模拟PE/PE复合材料层合板力学行为的模型[9]。下面首先对修正的拟三维模型进行介绍，然后应用此模型作一定分析。

修正的拟三维数值模型中有如下假设：(1) 纤维是连续的、均匀的，基体为各向同性。(2) 各根纤维的横截面均为圆形，并且直径相等。(3) 纤维与基体之间的界面为理想粘结，且界面厚度无限小。

图1(a)表示厚度为h_0、纤维体积含量为V_{f0}的复合材料单层板横截面，且该单层板基体中的纤维

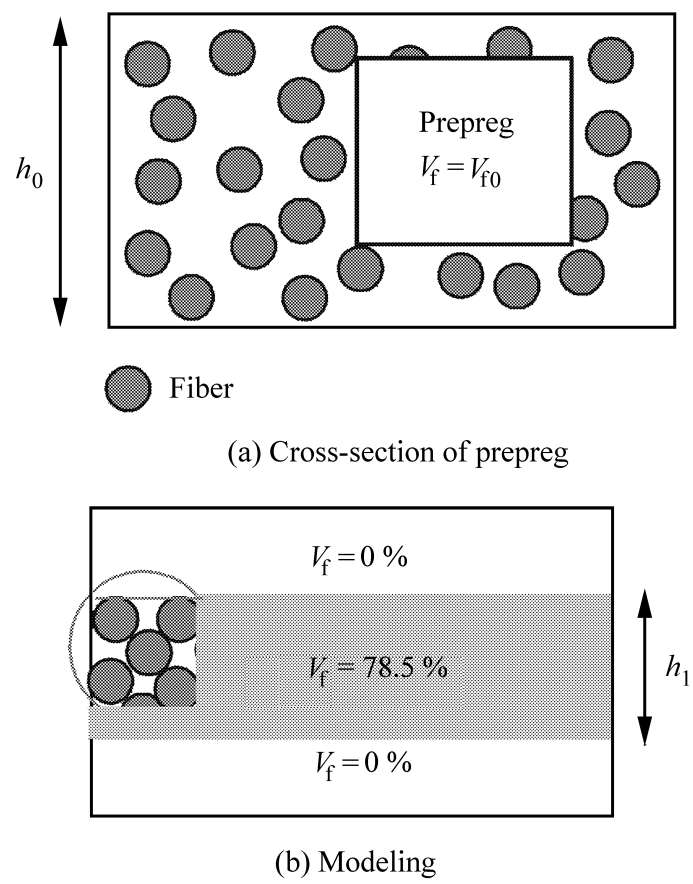


图1　拟三维模型的基本概念

Fig. 1　Basic concept of quasi-3-dimensional model

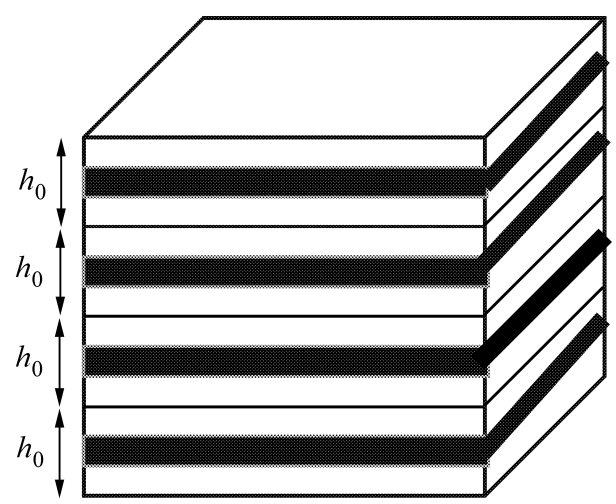
是随机排列的。分割层合板各单层为一个纤维区和两个树脂区，假设纤维区的纤维按正方形对角排列，则纤维隔距(S)与纤维体积含量(V_f)的关系[10]为：

$$S = 2\left(\frac{\pi}{4V_f}\right)^{1/2} - 1\ r \qquad (1)$$

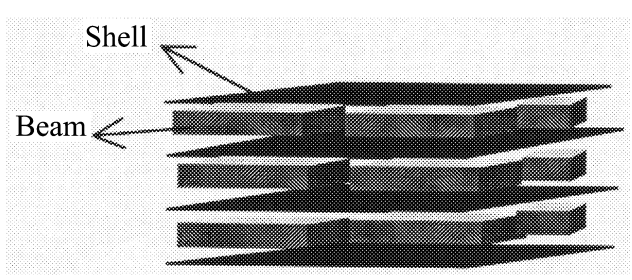
式中：S 表示两根相邻纤维表面之间的最小距离；r 为纤维半径。在式(1)中，当 S=0 时，纤维体积含量 V_f 达到理论最大值，$V_{f\,max}=0.785$，如图1(b)所示，这里我们把层合板各单层考虑成不均匀体。把纤维体积含量 V_f 为0.785 的纤维区用正交各向异性壳单元建立模型，树脂区用各向同性的梁单元建立模型。此时，壳单元的厚度：

$$h_1 = h_0 \times \frac{V_{f0}}{0.785} \qquad (2)$$

式中：h_0、V_{f0} 分别是原层合板单层的厚度和纤维体积含量。以四层的层合板复合材料(假设各单层厚度相等)为例进行拟三维建模，建模过渡体的形式如图2(a)所示。图2(b)显示了表现各层纤维部分的壳单元置于每层一半厚度处的中性面位置，壳单元之间的间隔 h_0 与原层合板各单层的厚度大小相等。在板厚度方向，用具有树脂材料属性的以体现层间的梁单元连接构成壳单元的节点。图3 表示拟三维模型的俯视示意图。图3 中梁单元的剖面形状根据梁单元位置不同而异，位于同一层间的梁单



(a) Intermediate



(b) Quasi-3-dimensional model

图2　拟三维模型示意图

Fig. 2　Schematic of quasi-3-dimensional model

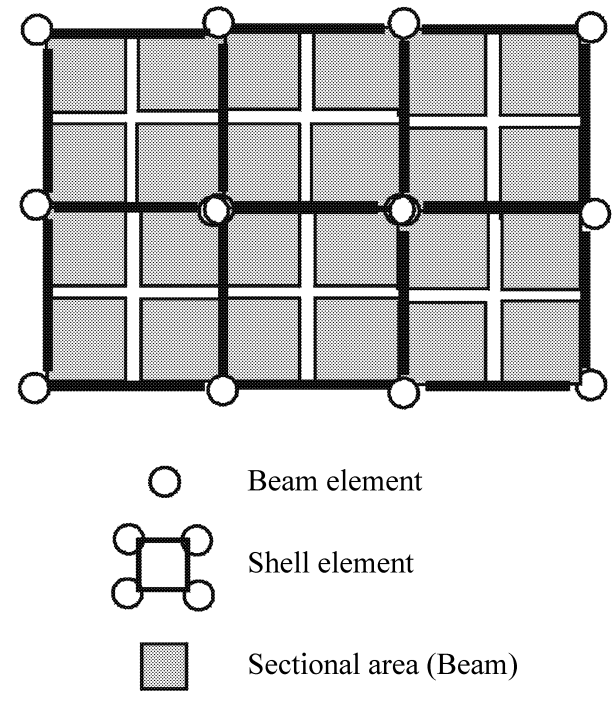


图3　拟三维模型的俯视图

Fig. 3　Top view of quasi-3-dimensional model

元截面积之和等于整体截面积。数值模拟所需壳单元和梁单元的材料性能参数经拉伸试验测定和应用 Halpin-Tsai 公式[11]计算得到。

2.2　拉伸损伤及其扩展的数值模拟

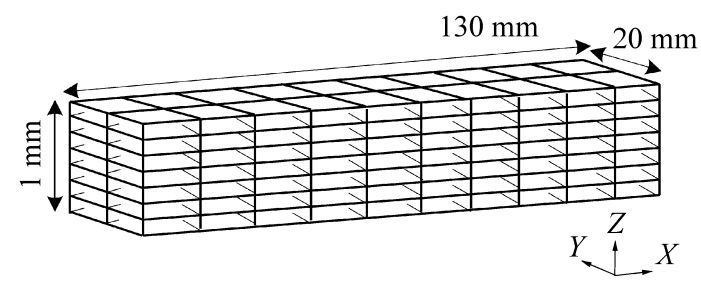


图4　应用于拉伸模拟的拟三维模型

Fig. 4　Quasi-3-dimensional model applied in simulating tension

选取[0/90/45/-45]$_s$(A 型)、[0/45/-45/90]$_s$(B 型)和[45/-45/0/90]$_s$(C 型)3 种准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板进行有限元数值模拟，采用的模型如图4 所示。此图中，X、Y、Z 轴分别表示拉伸载荷、层合板宽度和厚度方向。该模型一端固定，在另一端的最外层(第一层和第八层)端部节点上，用分步增加载荷的方法，分数十步施加拉伸载荷。在各步中，把每个壳单元和梁单元的应力值计算分解成垂直应力成分和剪切应力成分。对壳单元采用的强度准则为最大应力准则[10]。以 σ_l、σ_t 和 τ_T 分别表示壳单元材料坐标系的纤维轴向应力、横向应力和平面剪切应力成分，可通过使用公式(3)从整体坐标系转换为材料坐标系。

$$\begin{bmatrix}\sigma_l\\ \sigma_t\\ \tau_T\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta\\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta\\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix} \qquad (3)$$

对梁单元的屈服条件采用 Von-Mises 准则[12]，表示如下：

$$Y^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (4)$$

上式中 Y 表示基体树脂的屈服应力值。由于在拟三维模型中，全部的梁单元在 Z 方向排列，所以取：

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0$$

在进行数值模拟时，当壳单元应力随拉伸应力（σ）增大而逐渐增大至损伤基准时，通过将和纤维垂直方向的弹性模量折减为原值的0.4 倍[13] 来表现损伤而继续模拟。同时，当表现层间的梁单元应力也随 σ 逐渐增大而达到损伤基准时，通过将其弹性模量从740 MPa 降为74 MPa，阻碍应力的传递来表现层间分层。图5 显示了层合板 A 型数值模拟的结果。随拉伸应力增大，首先，构成90°层的壳单元横向应力 σ_x 达到横向强度 F_T（V_f = 0.785），这时，在90°层横向开裂出现，因此而引发在层合板中的应力场重新分布，通过将90°层横向弹性模量折减为原值的0.4 倍来表现损伤而继续模拟。随 σ 增大，表现层间的梁元素开始屈服，屈服条件采用 Von-Mses 准则。继续增大 σ，考察了屈服的各梁单元，即层间分层扩展。为了确认相应数值模拟方法的有效性，取3 种准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板，即 $[0/90/45/-45]_s$（A 型）、$[0/45/-45/90]_s$（B 型）和 $[45/-45/0/90]_s$（C 型）为试样，用 SANS 电子万能试验机，进行了拉伸试验，拉伸载荷的速度为2 mm/min。

3　结果和讨论

经分析得到，以上3 种准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板数值模拟和试验结果的拉伸应力-应变曲线比较一致。以层合板 A 型为例，如图5 所示，经数值模拟得到，当拉伸应力 σ 增大到16.93 MPa 时，90°层开始横向破裂；当 σ 为24.73 MPa 时，±45°层产生横向裂纹。根据梁单元的屈服对应层间剥离，当 σ 为48.00 MPa 时，90/45 层间分层发生。如图6 所示，随拉伸应力的增大，

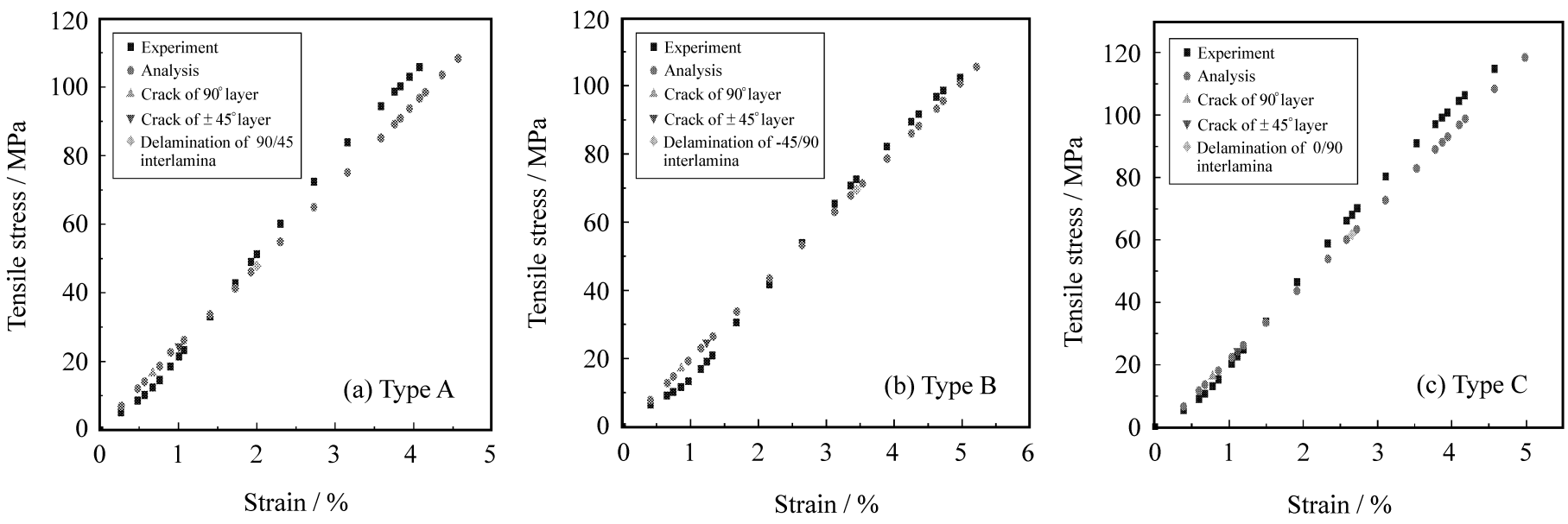


图5　UHMWPE/HDPE 层合板数值模拟和试验结果的比较

Fig. 5　Comparison of analytical and experimental results for UHMWPE/HDPE laminate

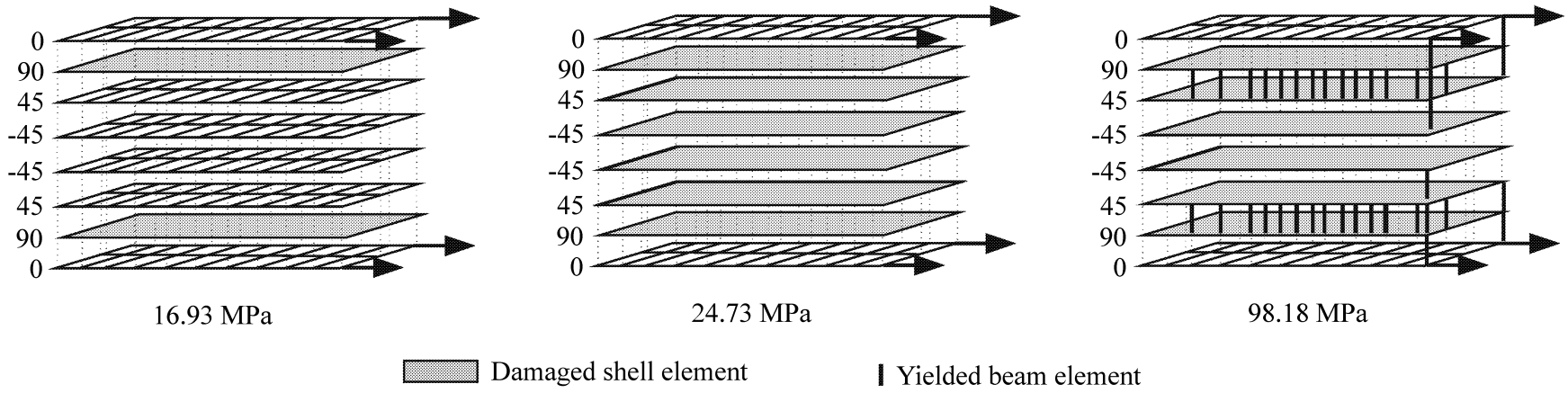


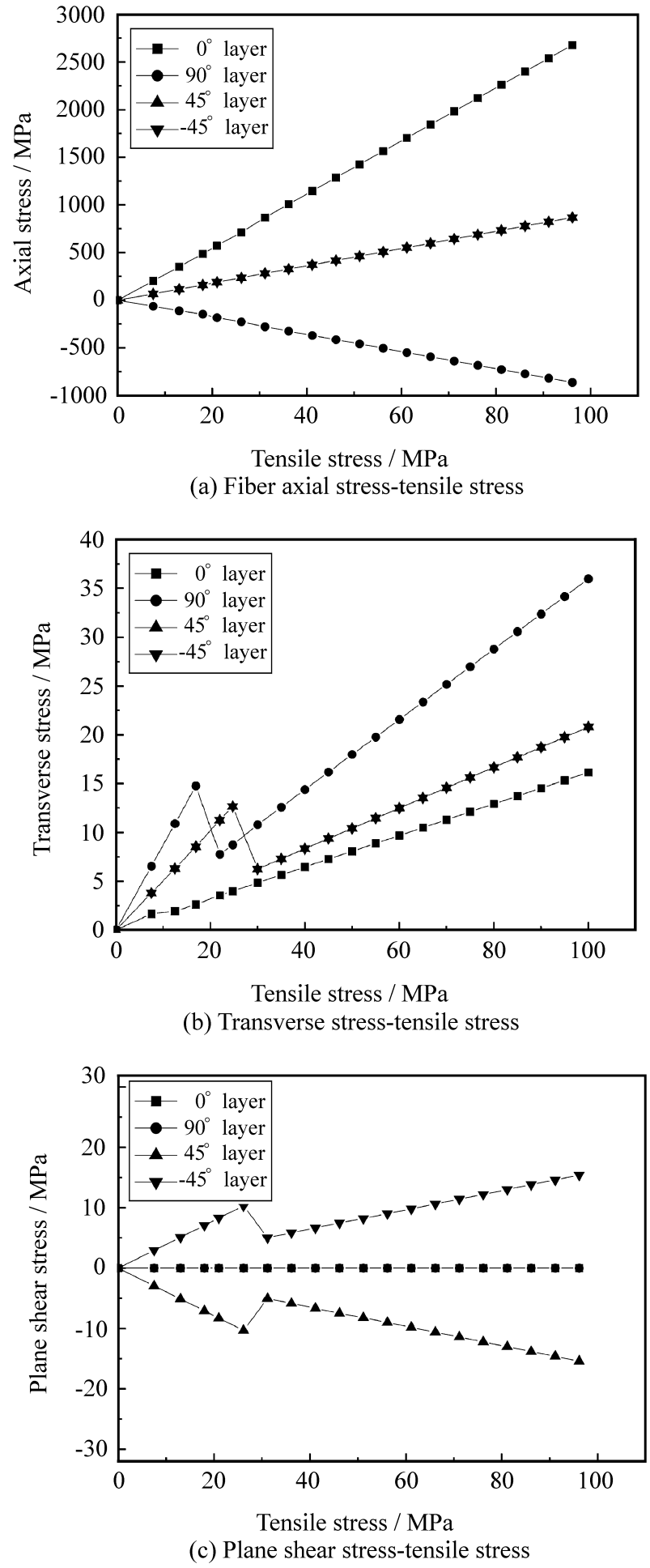
图6　A 型 UHMWPE/HDPE 层合板在面内拉伸载荷下的损伤扩展过程

Fig. 6　Damage propagation process of UHMWPE/HDPE laminate type A under in-plane tensile loading

梁单元的屈服在同一层间内逐渐扩展。当拉伸应力 σ 增大到98.18～127.34 MPa 时，层合板因90/45 层间分层损伤严重扩大而断裂。试验测定 A 型 UHMWPE/HDPE 层合板拉伸强度时，连续加载至其破坏，得到试样平均最大载荷值是105.05 MPa。从已破坏的试样外观来看，原条形试样仍成一个整体，未断裂成两段或更多段，但试样内部结构破裂、泛白的迹象明显可见。经观察分析认为，准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板的拉伸断裂是从它的纤维 基体界面脱粘、基体开裂和层间分层及其逐渐扩展、最后严重层间分层而导致的。为进一步验证此推论，后续研究工作将使用先进的声发射仪，进行相关的试验。类似地，对层合板 B 型来说，当拉伸应力 σ 增大到16.90 MPa 时，90°层开始横向破裂；当 σ 为24.79 MPa 时，±45°层产生横向裂纹。根据梁单元的屈服对应层间剥离，当 σ 为70.61 MPa 时，-45/90 层间分层发生；当拉应力 σ 增至97.29～127.90 MPa 时，-45/90 层间分层损伤严重扩大而导致断裂。对层合板 C 型，当 σ 为16.87 MPa 时，90°层开始横向破裂；当 σ 为24.90 MPa 时，±45°层产生横向裂纹。在 σ 达61.70 MPa 时，0/90 层间分层开始发生；随拉应力 σ 增大到98.10～121.38 MPa 时，0/90 层间分层损伤严重扩大而导致断裂。B 型、C 型层合板的试验拉伸断裂平均最大载荷值分别为105.26 MPa、109.15 MPa。

从数值模拟结果可知，虽然3 种准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板的铺层次序不同，但其单层板开始破裂的顺序相同，即首先为90°层，然后是±45°层同时破裂。而层间分层产生及其扩展与层合板的铺设角度、铺层顺序密切相关。

下面，讨论准各向同性 UHMWPE/HDPE 层合板 A 型各层壳单元的面内应力成分 σ_L、σ_T 和 τ_{LT} 随拉伸载荷变化的情况，如图7 所示。这里，σ_L、σ_T 和 τ_{LT} 分别表示纤维轴向应力、横向应力和平面剪切应力。通过分析数值模拟数据可知，具有相同纤维铺设角度的单层板应力相同，例如，第一层和第八层，第二层和第七层。由图7(a) 可知，0°层的 σ_L(σ_L^0) 比45°层(σ_L^{45}) 和-45°层(σ_L^{-45}) 的大得多，而90°层的 σ_L(σ_L^{90}) 总是负值。分析图7(b) 可知，应力 σ_T^{90} 突然下降，相应于90°层横向破裂的出现。类似地，σ_T^{45} 和 σ_T^{-45} 突然下降，分别相应于45°层和-45°层横向破裂开始，且 $\sigma_L^{45}=\sigma_L^{-45}$，$\sigma_T^{45}=\sigma_T^{-45}$。由图7(c) 显示，$\tau_{LT}^0$ 和 τ_{LT}^{90} 总是等于零，τ_{LT}^{45} 和 τ_{LT}^{-45} 的绝对值相等，负号相反。



(a) Fiber axial stress vs tensile stress;

(b) Transverse stress vs tensile stress;

(c) Plane shear stress vs tensile stress

图7 UHMWPE/HDPE 层合板 A 型各层应力成分与拉伸载荷关系

Fig. 7 Stress components on each layer plotted against tensile load for type A of UHMWPE/HDPE laminate

4 结 论

应用修正的拟三维有限元数值模型，模拟了准各向同性 UHMWPE/ HDPE 层合板在拉伸载荷作用下的损伤及损伤扩展过程和预测了其强度。通过和试验结果比较可知，准各向同性 UHMWPE/ HDPE 层合板的应力 应变关系能以良好的精度数值模拟，发生横向破裂和层间分层的应力水平及层间分层扩展是可以预测的。从准各向同性 UHMWPE/ HDPE 层合板损伤扩展来看，虽然准各向同性 UHMWPE/ HDPE 层合板的铺层次序和铺设角度不同，但其单层板开始破裂的顺序相同，即首先从90°层开始发生损伤。然而，对应上述各种层合板的单层板发生横向破裂、层间分层以及层间分层扩展的应力值和预测的强度值各不相等，表明层间分层的产生及其扩展与层合板的铺设角度、铺层顺序密切相关。

参考文献:

[1] Teishev A, Marom G. Effect of transcrystallinity on the transverse mechanical properties of single-polymer polyethylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1995, 56(8): 959 - 966.

[2] Devaux E, Cazé C. Composites of UHMW polyethylene fibers in a LD polyethylene matrix —— Ⅱ: Fibre/ matrix adhesion [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(6): 879 - 882.

[3] Rochette A, Bousmina M, Lavoie A. Effect of surface treatment on mechanical properties of polyethylene composite [J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(8): 925 - 940.

[4] Capiati N J, Porter R S. The concept of one polymer composites modeled with high density polyethylene [J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(10): 1671 - 1677.

[5] Marais C, Feillard P. Manufacturing and mechanical characterization of unidirectional polyethylene-fiber/ polyethylene-matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 1992, 45(3): 247 - 255.

[6] Nishiwaki T, Yokoyama A, Maekawa Z, et al. A new numerical modeling for laminated composites [J]. Composite Structures, 1995, 32(1 - 4): 641 - 647.

[7] Nishiwaki T, Yokoyama A, Maekawa Z, et al, Tensile damage analysis method for composite laminates using a quasi-3-dimensional model [J]. JSME International Journal, 1995, 38A(1): 16 - 22.

[8] 早崎 悟, 北川 和男, 西脇 剛史, 等. 擬三次元モデルを用いたポリアリレ- ト繊維/ エポキシ擬似等方性積層板の損傷解析 [J]. 日本複合材料学会誌, 1997, 23(5): 220 - 227.

[9] Zhuang X M, Yan X. A quasi-3-dimensional model for numerical simulation of damage propagation in PE/ PE composite laminates [A]. In: College of Textiles, Donghua University, ed. Proceedings of the Textile Institute 83rd World Conference-3 [C]. Shanghai, 2004. 1131 - 1134.

[10] Hull D. An Introduction to Composite Materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 60 - 64.

[11] Jones R M. Mechanics of Composite Materials [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1975. 173.

[12] Owen D R J, Hinton E. Finite Elements in Plasticity [M]. Swansea: Pineridge Press Limited, 1980. 227.

[13] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 183 - 185.