复合材料学报 第28卷 第1期 2月 2011年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 28 No. 1 February 2011

文章编号：1000-3851(2011)01-0223-07

复合材料随机渐进失效分析与声发射监测

李海斌，阳建红*，刘承武，张 晖，邓 凯
（第二炮兵工程学院，西安 710025）

摘 要： 结合随机渐进失效分析方法和声发射监测对复合材料单向拉伸试件进行损伤分析。结果表明：随机渐进失效方法能很好地反映复合材料失效的随机性和渐进性特征。受载初期，复合材料失效的随机性特征明显，在整个试件内均有失效产生。随着载荷的增加，损伤不断累积，“随机临界核”形成，复合材料很快失效，且一旦有失效产生，纤维断裂数的增加与声发射事件数的累积具有很好的一致性。比较基体开裂和界面脱粘对复合材料拉伸性能的影响：界面脱粘比基体开裂更容易导致复合材料拉伸性能的下降，当不存在基体开裂和界面脱粘时，纤维断裂呈现“集簇”特征，复合材料断裂的脆性特征较为明显。

关键词： 随机渐进失效；声发射；复合材料；纤维断裂；基体开裂；脱粘

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Stochastic progressive failure analysis and acoustic emission monitoring of composites

LI Haibin, YANG Jianhong*, LIU Chengwu, ZHANG Hui, DENG Kai
(The Second Artillery Engineer College, Xi'an 710025, China)

Abstract: Damage analysis of axial tension specimen was implemented by stochastic progressive failure analysis and acoustic emission (AE) monitoring. The results show that the stochastic progressive failure analysis characteres failure of composite materials well. In the early load stage, the stochastic character of composite failure is apparent, and the failure occurs in the whole specimen. With the load increasing, damage accumulates, “stochastical critical nuclei” emerges and the composite fails completely and quickly. Once there is failure happens, fiber breakage number is positive correlative with AE events. The effect of matrix crack and interface debonding on the composites was also compared and it is found that interface debonding affects tensile strength drop of the composite more severely than matrix crack, if matrix crack and interface debonding are not taken into consideration, clustering characteristics of fiber fracture appears and the composite fails in brittle manner.

Keywords: stochastic progressive failure; acoustic emission; composites; fiber breakage; matrix crack; debonding

复合材料的损伤失效具有渐进性和随机性。其失效是由组分材料的各种损伤，包括基体开裂、界面脱粘和纤维断裂等逐步累积的结果。采用首层失效假定或最终层失效假定对复合材料进行失效分析，可能导致结果保守，且均不易分析损伤破坏机制[1]。渐进失效分析方法，通过应力分析和失效分析，并考虑承载过程中的刚度衰退，模拟复合材料实际承载失效过程，它能够确定复合材料的破坏机制、破坏发展方向，因此更多学者倾向于采用它来分析和预测复合材料的失效和强度[2]。另一方面，复合材料损伤的起始和发展具有随机性，损伤起始于随机分布的薄弱环节，之后沿薄弱环节不断扩展，从本质上说，复合材料损伤是概率统计意义下不可逆的结构系统内变量的连续演化过程，因此将概率统计方法引入到复合材料损伤问题的研究是必要的[3]。仅考虑纤维强度的分散性时，Rosen 最早根据单根纤维的强度分布规律，进行复合材料失效强度的理论预报[4]。其后，Zweben、Harlow 和 Phoenix 在 Rosen 方法的基础上加入“裂纹扩展”和“应力集中”等更加符合实际破坏状态的因素[5]。曾庆敦[6]等提出了随机扩大临界核统计模型，更好地描述复合材料的损伤破坏过程。

考虑纤维强度的分散性时，必然从细观出发，进行宏细观一体化研究，由此带来的计算代价是巨大的。一般的细观力学方法不能满足其精度和效率的要求，Aboudi[7-9]等人提出的单胞模型

收到初稿日期： 2009-12-31；**收到修改稿日期：** 2010-05-05
基金项目： 总装备部“十一五”装备预研项目(51328040106)
通讯作者： 阳建红，教授，博士生导师，研究方向：导弹武器发射系统生存技术研究 E-mail：zwmyjh@hotmail.com

GMC 精度与有限元相当，而计算效率远远高于有限元方法，满足宏细观方法对精度和效率的要求。Collier[10] 于 2001 年将 GMC 模型融入到结构分析和优化的 HyperSizer 软件进行复合材料结构的优化分析，Bednarcyk 在 2006 年利用 HyperSizer 软件和 GMC 对 AS4/3504－6 碳/环氧复合材料加强板进行了宏细观渐进失效分析[11]，2007 年，又提出了复合材料宏细观结合随机渐进失效分析框架[12]。本文作者在该分析框架内，考虑纤维强度的 Weibull 分布特性，将通用有限元软件 ANSYS 与单胞模型 Parametric FVDAM 相结合，对复合材料单向拉伸试件进行随机渐进失效分析，并通过声发射技术对损伤过程进行监测，为复合材料及其结构的损伤失效分析提供了一种新的研究思路。

1 随机渐进失效分析模型的建立

根据 GB 3354－82[13]，单向纤维增强复合材料拉伸试件分为Ⅰ型和Ⅱ型。由于Ⅰ型试件加工上的困难，实际多采用Ⅱ型试件(图 1)，两端用铝片加强，试件标距范围内处于均匀应力/应变状态。显然，如不考虑损伤的随机性，将无法判断试件损伤如何发生。事实上复合材料总会在最薄弱环节产生失效并不断扩展。由于纤维强度一般服从 Weibull 分布[14]，本文中假设最早失效由纤维最弱的单元引起。以单胞模型 Parametric FVDAM[8-9] 求得的复合材料性能作为材料输入参数，通过有限元方法获得复合材料在外载荷作用下的宏观响应，调用细观力学程序求得细观应力/应变场，据此判断复合材料的失效，根据不同的失效形式进行相应的刚度退化，并重新用细观力学方法获得复合材料的性能参数，增加载荷，进行下一步计算，直到材料发生整体破坏。

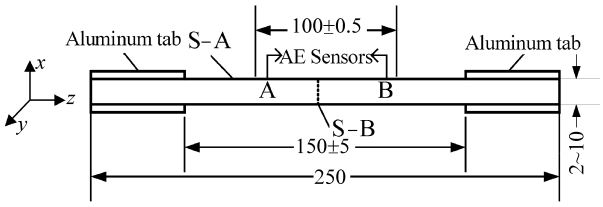

图 1 单向拉伸试件(单位：mm)

Fig. 1 Axial tension specimen (unit: mm)

考虑材料失效时，对于纤维和基体单元，采用最大应力作为失效准则。对于界面失效，Caporale 根据界面滑移和界面法向脱粘 2 种失效形式，提出相应的失效准则[15]：

界面滑移：$\sqrt{\sigma_{nt}^2+\sigma_{nb}^2}=\tau^{\lim}$；

法向脱粘：$\sigma_{nn}=\sigma^{\lim}$

式中：n 和 t 分别代表按右手法则建立的界面坐标系(n，t，b)中的法向和切向，皆垂直于纤维轴向“b”方向；$\tau^{\lim}$ 和 $\sigma^{\lim}$ 为界面切向和法向所能承受的最大应力。

纤维和基体单元失效后，相应的模量值设为一极小值 10^{-6}；界面滑移时，切向柔度系数 R_t 设为 0.01，法向脱粘时，法向柔度系数 R_n 设为 0.01，初始时理想粘结，R_t 和 R_n 均为 0。

研究材料为芳纶 F－12/环氧复合材料，纤维的轴向性能参数在 GMT 2103 电子拉伸机上按照 GB 3915 进行单丝拉伸实验获得[14, 16]，其他参数见文献[17]，纤维体积分数为 60%。计算中的材料性能参数见表 1。

表 1 计算中的材料性能参数

Table 1 Material properties used in the calculation

Materials	Property parameter
F－12	$E_L=140$ GPa，$E_T=4$ GPa，$\nu_f=0.22$，$\sigma_0=4000$ MPa，$m=10$，$l_0=50$ mm
Epoxy 4304	$E_m=3.5$ GPa，$\nu_m=0.30$，$\sigma_m=83$ MPa
Interface	$\sigma^{\lim}=83$ MPa，$\tau^{\lim}=48$ MPa

对Ⅱ型试件标距部分采用 ANSYS 11.0 建模，共划分 100(长)×20(宽)×20(厚)个单元，44541 个节点，单元类型为 SOLID 45；轴向单元长度为 1 mm，小于纤维无效长度的 2 倍(约 1.1 mm[18])，使其在单元长度内仅能发生 1 次纤维断裂失效。分别对仅存在纤维断裂、伴有基体开裂、基体开裂和界面脱粘同时存在 3 种情形的损伤过程进行分析。分析试件上表面 S－A 截面(图 1，$x=2$ mm，$y-z$ 平面)及垂直纤维轴向的 S－B 截面($z=50$ mm，$x-y$ 平面)内的损伤演化。3 种情形下保持纤维强度数据不变，纤维强度数据按照 Weibull 分布由下式产生：

$$\sigma_f=\left[\ln\left(\frac{1}{1-p(\sigma_f)}\right)\right]^{\frac{1}{m}}\left(\frac{1}{L}\right)^{\frac{1}{m}}\cdot\sigma_0 \tag{1}$$

式中：$p(\sigma_f)$为随机产生的失效概率，$0<p(\sigma_f)<1$；L 是关于某一参考长度 l_0 的长度比；l 为纤维单元长度，$L=l/l_0$。

2 随机渐进失效分析

2.1 损伤演化过程

图 2 为仅考虑纤维断裂以及同时考虑基体开裂和界面脱粘的情形下 S－A 截面的损伤演化。由图可见，不同情形下最早失效皆由最弱的纤维单元引起，首次失效发生后，断裂单元临近的纤维单元或

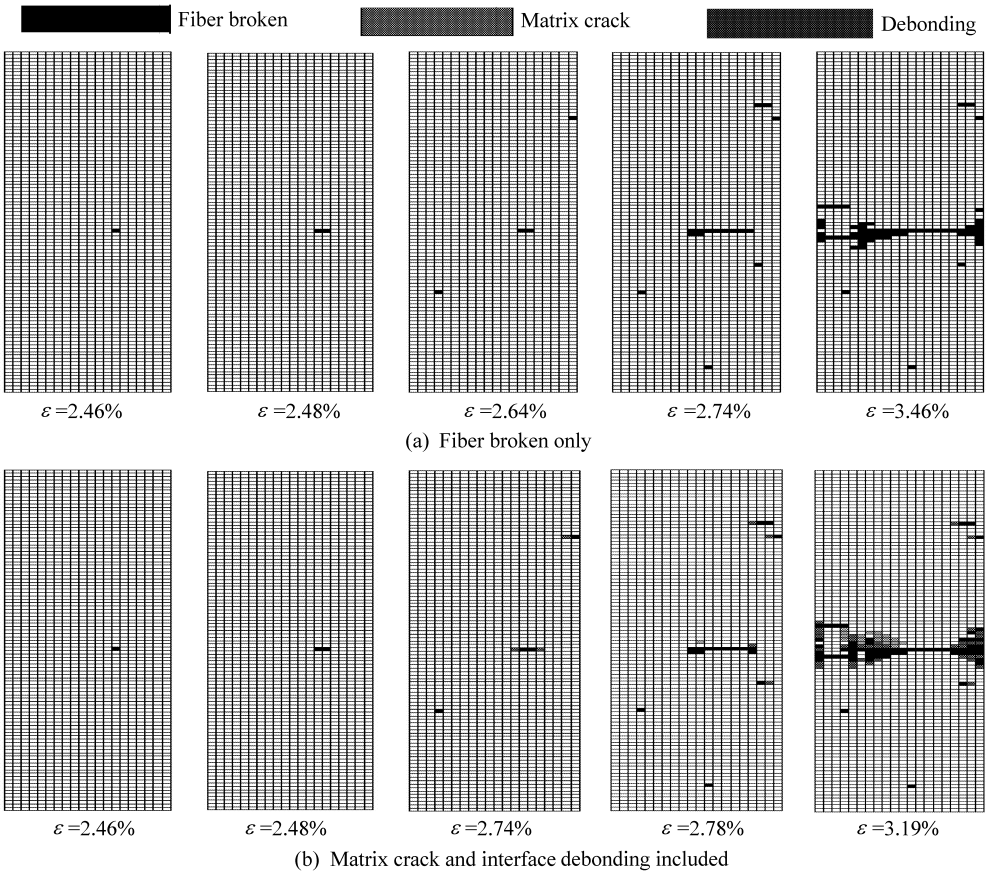

图 2　S－A 截面的损伤演化

Fig. 2　Damage evolution in section S－A

次弱的纤维单元皆有可能随之失效，具有随机性，随着载荷的增加，断裂纤维逐渐造成更多相邻单元的失效，复合材料的承载能力急剧下降直至完全失效。当存在基体开裂或界面脱粘时，纤维断裂引起的应力集中还有可能导致临近单元基体开裂或界面脱粘的发生，同一单元相继发生几种失效形式，各种失效逐步累积。在基体开裂和界面脱粘发生的先后顺序上，图 2(b)显示，基体开裂发生在 $\varepsilon=2.74\%$左右，而界面脱粘则发生在 $\varepsilon=2.78\%$左右，基体开裂先于界面脱粘的发生，这与一般复合材料的失效模式相同。基体开裂和界面脱粘不仅导致损伤失效过程发生变化，还引起复合材料最终承载能力的下降。仅发生纤维断裂时最终失效应变为 3.46%，而发生基体开裂和界面脱粘时，最终失效应变降至 3.19%。

2.2　破坏形貌分析

图 3 为仅考虑纤维断裂、伴有基体开裂、基体开裂和界面脱粘同时考虑 3 种情形下垂直于拉伸方向的中部截面 S－B 处纤维单元的破坏形貌。

不同情形下纤维的断裂形貌表现为以下 3 个特征：(1) 均在最弱单元首先产生失效，在首次失效后，纤维断裂造成的应力集中并不立即使相邻单元失效，下一次产生纤维断裂的单元具有很大的随机性，随着载荷的增加，纤维断裂数增多，应力集中的影响增大，发生相邻单元断裂的可能性增加，由此产生“随机临界核”，此后纤维大量断裂，造成复合材料失效。(2) 最先失效时的应变相同，之后要产生同等数目的纤维断裂，考虑基体开裂和界面脱粘时，需要的应变增加，这是由于基体开裂和界面脱粘的发生降低了纤维的应力集中系数，未断纤维分担的载荷减小，断裂应变增加，同时由于基体开裂和界面脱粘影响了纤维强度的发挥，最终断裂时的应变和应力均小于单独考虑纤维断裂时的情形。在 3 种情形下，最早失效均发生在 $\varepsilon=2.46\%$时，这是由于 3 种情形下各相应单元赋予的强度值均相同，最弱单元失效之前并无其他失效产生；纤维单元大规模断裂在仅考虑纤维断裂时，发生于 $\varepsilon=2.64\%$(图 3(a))左右，而考虑基体开裂情形，发生于 $\varepsilon=2.73\%$左右(图 3(b))，若有界面脱粘发生，则发生在 $\varepsilon=2.78\%$以后(图 3(c))。(3) 最终断裂形貌在不发生基体开裂和界面脱粘时，大多数纤维单

元断裂，表现为“集簇”特征(图 3(a))，而考虑基体开裂时(图 3(b))，这种特征明显减弱，发生界面脱粘时(图 3(c))，此特征可能消失，发生纤维断裂的单元亦相应减少。

2.3 应力集中系数的变化

图 4 为仅考虑纤维断裂时，在试件整体失效

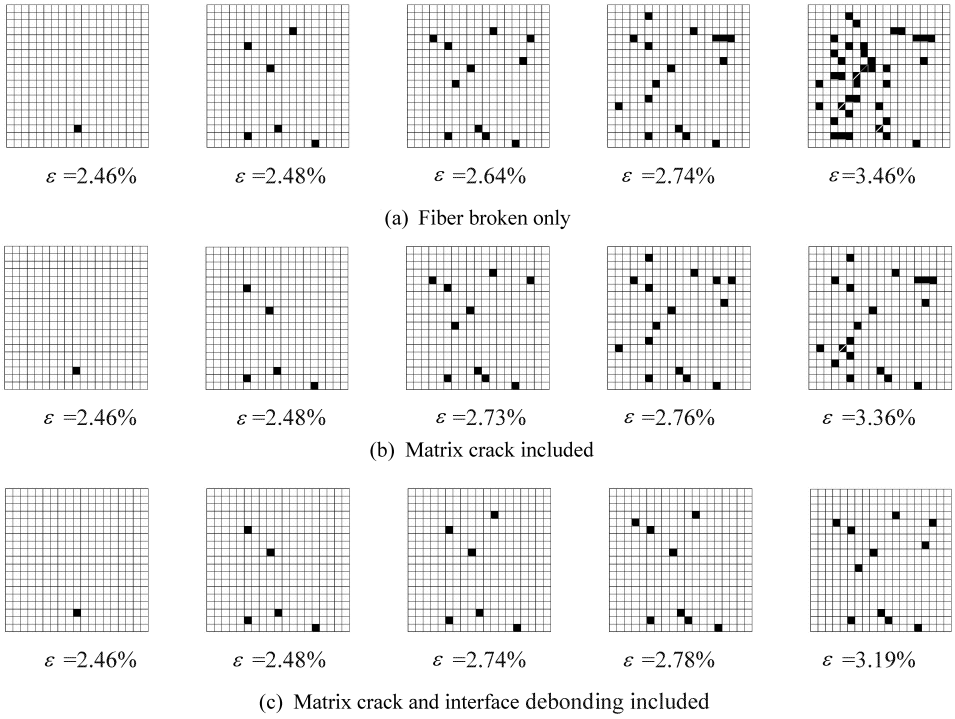

图 3 S－B 截面纤维单元的破坏形貌

Fig. 3 Breakage patterns of fiber elements in section S－B

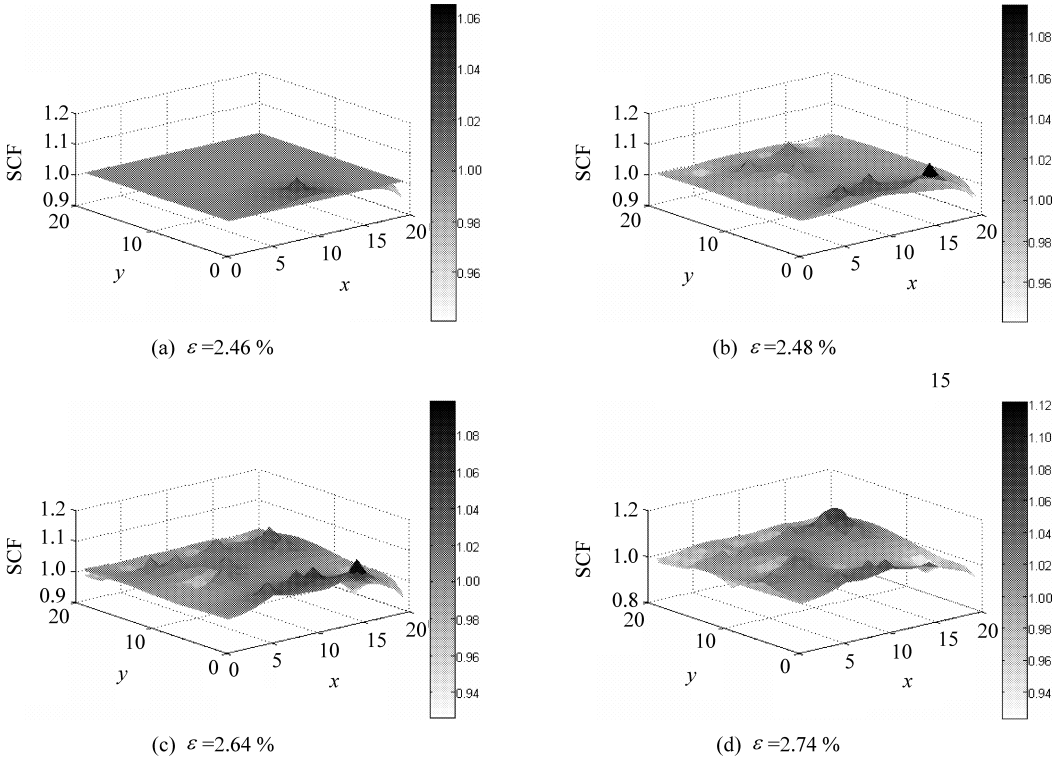

图 4 仅考虑纤维断裂时应力集中系数的变化

Fig. 4 Stress concentration factor (SCF) in condition of only fiber breakage is taken into consideration

前，S－B 截面单元断裂后对临近单元应力集中的影响。从图 4 可看出，纤维单元失效后，对临近单元造成了应力集中，应力集中系数在 1.08 左右，与采用 FEM 的结果相近[19]，随着纤维断裂数的增多，未断纤维承担的载荷增大，应力集中系数不断增大，临近单元受纤维断裂的影响亦增大。在试件即将断裂时，最大应力集中系数已经超过 1.12。

应力集中系数与纤维强度的分散性共同影响试件的损伤演化，载荷初期，未断单元受应力集中的影响较小，下一个失效的单元并不一定发生在受应力集中影响的单元，而是具有某种随机性，极有可能发生在纤维强度更弱的单元，载荷不断增加后，较弱的单元不断失效，应力集中的影响也不断增大，相邻单元相继失效的可能性增加，“随机临界核”形成，试件很快整体失效。

考虑基体开裂时，开裂的影响使得应力集中系数增大的趋势不明显，基体开裂和界面脱粘同时考虑时，大量基体开裂和界面脱粘的发生，应力集中系数增加的趋势更加减缓。但在最终失效时，伴随纤维断裂数目的增加，应力集中系数均达到最大。

3　单向拉伸实验与声发射监测

根据 GB 3354－82 制作单向复合材料Ⅱ型试件并在 CMT 5205 电子式万能实验机上进行测试。在加载过程中使用美国 PAC 公司产的 SAMOSTM 32 型 32 通道声发射仪监测试样损伤断裂过程。声发射主要设定参数：增益，40 dB；阈值，35 dB；拉伸机拉伸速率 1 mm/min；声发射传感器 A、B 间间距 80 mm(图 1)。

3.1　应力-应变曲线

图 5 为实验和模拟得到的应力-应变曲线，两者在加载初期吻合较好，中后期产生偏差，尤其是仅考虑纤维断裂情形，偏差更大，计算得到的强度值明显高于实验值。另取试件加载到约 70％破坏载荷卸载后进行扫描电镜观察(图 6)，此时已有大量纤维从基体中分离，但尚未断裂。界面脱粘对复合材料轴向拉伸强度产生了较大的影响。由于芳纶复合材料界面粘结性能较差，要准确地描述其损伤失效过程，显然需综合考虑纤维、基体和界面的影响。

在 3 条模拟曲线上，仅考虑纤维断裂时，纤维大量断裂后，随着应变增加，复合材料应力急剧下降，并很快失效，残余载荷值很小，材料破坏的脆性特征较为明显；而考虑基体开裂尤其是界面脱粘时，随着应变增加，复合材料应力首次下降后，还

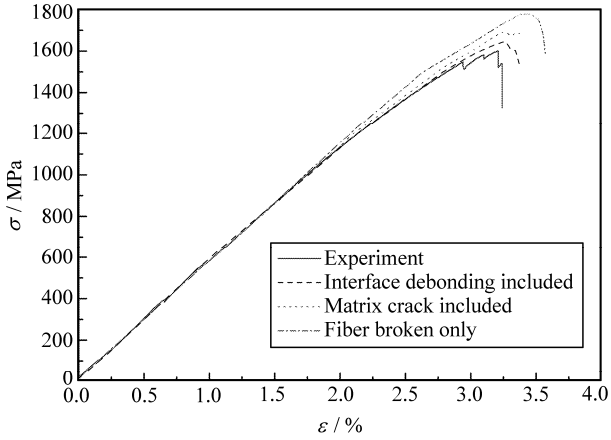

图 5　F－12/环氧复合材料的应力-应变曲线

Fig. 5　Stress－strain curve of F－12/epoxy

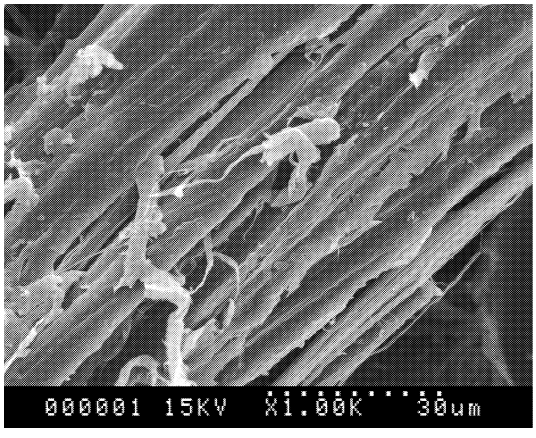

图 6　破坏载荷约 70％时的电镜照片

Fig. 6　SEM of F－12/epoxy at about 70％ ultimate load

会出现应力重新上升的情形，应力-应变曲线出现一系列的“拐折”。这是因为基体开裂或界面脱粘的出现，降低了相邻纤维单元的承载能力，荷载略有松弛，而纤维单元并未发生断裂，随着载荷的增加逐渐发挥其承载能力，导致应力略有下降后又重新上升，应力-应变曲线产生多个折线段，这样更加真实地反映了复合材料的失效过程，此时得到的复合材料强度值与实验值也更为接近。

3.2　声发射监测

图 7(a)～7(d)分别为芳纶复合材料声发射幅度-载荷-时间、能量-时间、事件数-幅度以及初始阶段(加载 60 s 时)的声发射定位图。

由声发射结果可将复合材料的拉伸过程分为 3 个阶段[20]。第Ⅰ阶段(0～100 s)，幅值小于 60 dB，能量很小，主要由基体的微观开裂引起，这一阶段初期有少量较高幅值的声发射事件出现，但能量较低，这是由加载初期夹具与加强片之间的摩擦咬合

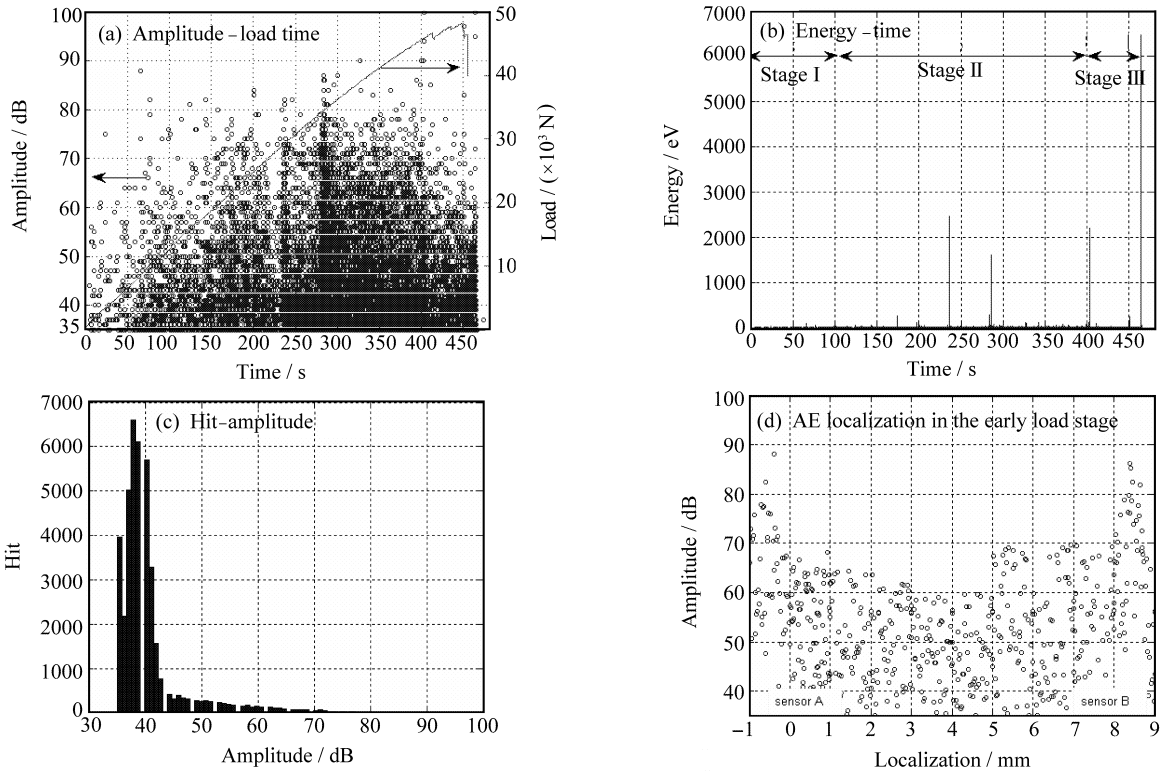

图 7　声发射特性曲线

Fig. 7　Characteristic curves of AE

传感器之间的低幅值事件数则相对均匀，受复合材料随机特征的影响，加载初期不易造成局部的应力集中，损伤在复合材料整个平面内皆有发生。这与前文分析结果吻合较好。第 Ⅱ 阶段(100～400 s)为基体开裂及界面脱粘阶段，随载荷的增加，界面薄弱处发生脱粘，而基体裂纹在遇到纤维又不足以使纤维断裂时，将改变传播方向，沿界面偏转，导致界面脱粘，此阶段有少量高能量高幅值事件出现(图 7(b))，应力-应变曲线逐渐偏离线性。第 Ⅲ 阶段(400 s后)，大量纤维断裂，高幅度、高能量事件产生，复合材料发生整体破坏。由图 7(c)事件数-幅度关联图统计可以得出，85.3%的声发射事件幅值在 60 dB以下，这些事件来源于环氧基体内部裂纹的形成和平稳扩展。这一现象表明，尽管各阶段主要失效形式不同，其他失效仍然同时存在，具有累积特征。

图 8(a)、8(b)分别为芳纶复合材料声发射事件数以及由随机失效分析得到的纤维断裂数随载荷的变化曲线。加载初期，随载荷增加，纤维断裂数和声发射事件数逐渐增加，加载后期，纤维断裂数和声发射事件数均急剧上升直至材料失效。两者在发展趋势上具有很好的一致性。加载的最初阶段，仍有部分声发射事件出现，这与夹具和加强片的摩擦及咬合有关，且渐进失效考虑复合材料的失效最先由最薄弱的纤维引起，不反映最初由基体或界面引起的失效。另外，在纤维断裂数随载荷的变化曲线上，也反映了仅发生纤维断裂时，纤维断裂的数

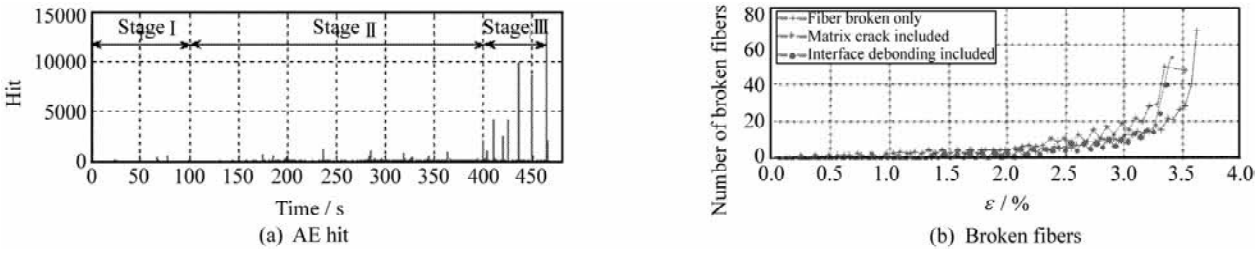

图 8　声发射事件和纤维断裂数的变化

Fig. 8　Variation of AE events and number of broken fibers

目大于发生界面脱粘和基体开裂的情形。

4 结　论

（1）从材料的细观非均匀性入手，考虑纤维强度的 Weibull 分布特性，采用宏细观相结合的渐进失效分析方法，实现了对复合材料单向拉伸过程的随机渐进失效模拟。

（2）随机渐进失效方法能够反映复合材料损伤演化和发展的随机特征以及损伤失效的不断累积过程。初始受载阶段，复合材料损伤的随机性较为明显，在整个试件内均有失效产生，随着载荷的增加，损伤不断累积，应力集中的影响增大，“随机临界核”形成，复合材料很快整体失效。

（3）发生基体开裂和界面脱粘时，断裂纤维临近单元受应力集中的影响减弱，纤维强度得不到充分发挥，复合材料承载力下降，且界面脱粘比基体开裂更容易导致复合材料拉伸强度的降低，若不考虑基体开裂和界面脱粘，则纤维断裂呈现“集簇”特征，复合材料断裂的脆性特征较为明显。

（4）一旦薄弱环节有失效产生，声发射事件数的增加与纤维断裂数的不断累积在发展趋势上具有很好的一致性。

参考文献：

[1] Reddy J N, Pander J N. A first-ply failure analysis of composite laminates [J]. Computer Structure, 1987, 25: 371-393.

[2] 赵美英. 复合材料机械连接失效分析及强度影响因素研究 [D]. 西安：西北工业大学，2006：47-48.

[3] 王宝来，吴世平，梁　军. 复合材料失效及其强度理论 [J]. 失效分析与预防，2006，1(2)：13-19.
Wang Baolai, Wu Shiping, Liang Jun. Strength theory and failure analysis of materials [J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(2): 13-19.

[4] 李红周，贾玉玺，姜　伟. 纤维增强复合材料的细观力学模型以及数值模拟进展 [J]. 材料工程，2006(8)：57-60.
Li Hongzhou, Jia Yuxi, Jiang Wei. Progress in numerical simulations and mesoscopic-mechanical models of fiber-reinforced composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(8): 57-60.

[5] Leon Mishnaevsky Jr, Povl Brøndsted. Micromechanical modeling of damage and fracture of unidirectional fiber reinforced composites: A review [J]. Computational Materials Science, 2009, 44(4): 1351-1359.

[6] 曾庆敦，复合材料的细观破坏机制与强度 [M]. 北京：科学出版社，2002，9：55-57.

[7] Aboudi J. Micromechanical analysis of composites by the generalized cells model [J]. Mechanics of Materials, 1992, 14(2): 127-139.

[8] Cavalcante Marcio A A, Marques Severino P C, Pindera Marek-Jerzy. Parametric formulation of the finite-volume theory for functionally graded materials Ⅰ: Analysis [J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(5): 935-945.

[9] Cavalcante Marcio A A, Marques Severino P C, Pindera Marek-Jerzy. Parametric formulation of the finite-volume theory for functionally graded materials Ⅱ: Numerical results [J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(5): 946-957.

[10] Collier Craig S., HITEMP materials and structural optimization technology transfer, NASA CR-2001-21166 [R]. 2001.

[11] Bednarcyk Brett A, Yarrington Phillip W, Collier Craig S, et al. Progressive failure analysis of composite stiffened panels, AIAA 2006-1643 [R]. Rhode Island: AIAA, 2006: 1-10.

[12] Bednarcyk Brett A, Arnold Steven M. A framework for performing multiscale stochastic progressive failure analysis of composite structures, NASA/TM-2007-214694 [R]. Glenn: Glenn Research Center, 2007: 1-16.

[13] 全国塑料标准化技术委员会纤维增强塑料标准化分技术委员会. GB 3354—82，定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法 [S]. 北京：中国标准出版社，1998.

[14] 李海斌，阳建红，石增强. 用改进的 Weibull 统计方法分析纤维强度的长度效应 [J]. 宇航材料工艺，2009，39(4)：14-17.
Li Haibin, Yang Jianhong, Shi Zengqiang. Length effect of fiber's strength analyzed by modified Weibull statistical method [J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(4): 14-17.

[15] Caporale A, Luciano R, Sacco E. Micromechanical analysis of interfacial debonding in unidirectional fiber-reinforced composites [J]. Computers and Structures, 2006, 84(31/32): 2200-2211.

[16] 阳建红，董进辉，李海斌. F-12 纤维的吸湿行为 [J]. 复合材料学报，2009，26(3)：84-89.
Yang Jianhong, Dong Jinhui, Li Haibin. Moisture absorption behavior of F-12 fiber [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 84-89.

[17] James N S. Experimental characterization of the transverse compression of poly(para-phenylene terephalamide) and other highly oriented fibers [D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 1998: 148-150.

[18] Kuperman A M, Bazhenov S L, Zelenskii E S. Effect of basic factors on the strength of para-aramid fibres in unidirectional organoplastics [J]. Fibre Chemistry, 2003, 35(1): 65-72.

[19] Mahiou H, Béakou A. Local stress concentration and the prediction of tensile failure in unidirectional composites [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(12): 1661-1672.

[20] 郭艳阳，杜善义，王殿富. APMOC/环氧复合材料层板破坏过程声发射特征 [J]. 复合材料学报，1997，14(1)：58-63.
Guo Yanyang, Du Shanyi, Wang Dianfu. Acoustic emission characteristics of damage process for APMOC/epoxy composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(1): 58-63.