

# 基于改进遗传算法的 C/SiC 拉伸损伤声发射模式识别

张勇祯<sup>1,2</sup>, 童小燕<sup>1</sup>, 姚磊江<sup>1</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 白国栋<sup>1,2</sup>

(西北工业大学 1. 无人机特种技术国防科技重点实验室; 2. 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 采用层次聚类及基于改进遗传算法的无监督模式识别方法, 对 2D-C/SiC 复合材料常温拉伸试验过程的声发射数据进行分析, 结合试样断口的扫描电镜(SEM)照片, 得到拉伸过程中 5 类损伤模式及其典型声发射特征参数。通过对各类损伤的能量分布、累计事件数和累计能量的分析, 研究 C/SiC 复合材料的损伤演化过程, 发现其过程可分为基体微裂纹和界面失效为主的初始损伤阶段、基体微裂纹停滞导致层间剥离及纤维失效占主导地位的裂纹饱和阶段、基体长裂纹和界面失效为主的损伤积累发展阶段和纤维束大量失效的宏观断裂阶段。

**关键词:** C/SiC; 声发射; 改进遗传算法; 无监督聚类; 损伤

中图分类号: TB332 文献标识码: A

## Acoustic Emission Pattern Recognition on Tensile Damage Process of C/SiC Composites Using an Improved Genetic Algorithm

ZHANG Yongzhen<sup>1,2</sup>, TONG Xiaoyan<sup>1</sup>, YAO Leijiang<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, BAI Guodong<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The acoustic emission data collected during room temperature tensile test of 2D-C/SiC composites were analyzed by hierarchical clustering and unsupervised pattern recognition method based on an improved genetic algorithm. Combined with the SEM observation on the fracture surface, five damage modes were identified and their typical acoustic emission characteristics were obtained. According to the analysis of energy distribution, cumulative event number and cumulative energy of different damage modes, the damage evolution process of C/SiC composites can be divided into four stages. The first stage (damage initiation stage) shows mainly matrix microcracks and interface debonding. In the second stage, matrix crack reaches saturated and then causes a considerable quantity of interlaminar delamination and fiber failure. The third stage is a gradual damage development stage and all kinds of damage keep occurring except the breakage of fiber bundles. In the last stage, a large amount of fiber bundles break and the sample eventually fails.

**Key words:** C/SiC; acoustic emission; improved genetic algorithm; unsupervised clustering; damage

连续纤维增韧碳化硅(C/SiC)具有良好的高温性能, 在航空发动机、燃气轮机、空天飞行器等热结构中有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。它的损伤破坏过程存

在复杂的微观机制和交互作用, 传统的力学实验和微观观察无法对材料损伤演化过程进行在线监测, 难以对材料的损伤演化机制进行准确描述。通过声

收稿日期: 2019-05-09; 收到修改稿日期: 2019-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51772244, 11072195) National Natural Science Foundation of China (51772244, 11072195)

作者简介: 张勇祯(1994-), 男, 博士研究生. E-mail: zhangyongzhennpu@163.com

ZHANG Yongzhen(1994-), male, PhD candidate. E-mail: zhangyongzhennpu@163.com

通讯作者: 姚磊江, 教授. E-mail: yaolj@nwpu.edu.cn

YAO Leijiang, professor. E-mail: yaolj@nwpu.edu.cn

发射技术可以探测材料内部结构变化产生的瞬时弹性波,对材料内部各种损伤模式、损伤演化过程实现在线监测,准确地反映材料的服役性能<sup>[4-6]</sup>。

然而 C/SiC 材料失效过程会产生大量、复杂的声发射信号,如何将这些信号与材料的损伤机制关联起来,就成为需要解决的关键问题,即要建立可靠的声发射模式识别方法<sup>[7]</sup>。由于缺少足够的先验知识,对声发射信号的识别主要依靠无监督的聚类算法,结合材料损伤物理机制,建立声发射与损伤模式的映射<sup>[8-12]</sup>。MOMON S 等<sup>[9]</sup>采用聚类分析方法得出了复合材料在高温环境(700~1200 °C)下的损伤模式;童小燕等<sup>[10]</sup>通过采用K-均值聚类算法对常温拉伸试验下 C/SiC 复合材料的声发射信号特征参数进行了研究。黄喜鹏等<sup>[11-12]</sup>通过 K-均值聚类分析方法,用小波去噪后的声发射信号能量和幅值两个特征进行模式识别,研究了 3D-N C/SiC 和不同密度 C/SiC 复合材料在拉伸载荷作用下的损伤模式。C/SiC 复合材料拉伸损伤无监督的声发射模式识别存在两个关键问题:(1)聚类算法:目前绝大多数采用基于 K-均值聚类算法,但由于这是一种局部搜索技术,受初始聚类中心影响可能会过早收敛,失去全局最优解<sup>[13]</sup>,导致无法获得最佳聚类结果;(2)声发射特征参数选取:选取参数较少或者纯经验选择,可能会出现无法准确描述声发射信号特征的情况,从而影响聚类效果。

本研究针对声发射聚类分析中特征参数选取和 K-均值算法的不足,在 2D-C/SiC 复合材料室温拉伸试验的声发射数据模式分析中,以层次聚类进行参数降维和优选,并提出改进遗传算法和 K-均值算法相融合的聚类算法,即将 K-均值算法作为改进遗传算法的基聚类,实现改进遗传算法概率全局最优和 K-均值局部收敛速度快的优势相结合。基于该算法,结合断口形貌分析,描述拉伸破坏过程的损伤演化过程,完成 2D-C/SiC 室温拉伸过程中损伤模式的识别,为该材料在服役过程中损伤情况的在线评估提供指导。

## 1 实验方法

### 1.1 试样制备

采用化学气相渗透法(CVI)工艺制备 2D-C/SiC 陶瓷基复合材料样品,由西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室提供,材料的组成为 T-300 碳纤维、热解炭(PyC)界面层和 SiC 基体。纤维的体积含量约为 40%,孔隙率约为 15%,密度为 2.1~2.2 g/cm<sup>3</sup>。拉伸试样形状及尺寸如图 1 所示。

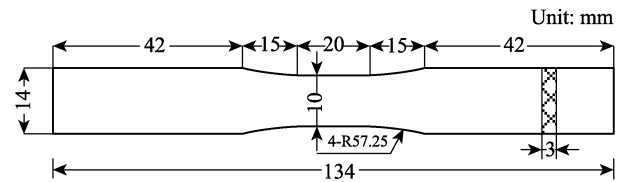


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the tensile specimen

### 1.2 拉伸试验

室温单调拉伸试验在 Instron8801 液压伺服疲劳试验机上进行,采用位移控制加载方式,加载速率为 0.5 mm/min。在试验过程中,利用美国物理声学公司的声发射仪(PAC PCI-II)进行在线监测(前置放大增益:40 dB,信号阈值:45 dB,采样率:1MSPS,带通滤波:20~1200 kHz)。拉伸试验后,使用日立 TM4000PLUS 台式扫描电镜观察断口形貌。

## 2 基于改进遗传算法的声发射模式识别

复合材料拉伸过程存在复杂的微观断裂机制,每种机制产生不同特征的声发射信号,需要建立声发射信号与这些断裂机制之间的关联,从而准确描述材料内部损伤演化过程。声发射模式识别包括以下过程:

(1)声发射信号的描述:通过对采集到的声发射信号进行小波去噪处理后,利用 AEWIN 软件提取声发射能量、平均频率、幅值、计数、上升时间等特征参数;

(2)特征参数选取:由于声发射信号能够提取到的参数很多,必须进行降维处理,选取典型特征参数;

(3)声发射聚类:采用无监督的模式识别算法对声发射信号进行分类;

(4)聚类有效性评价:对聚类结果进行评价,得到最优聚类结果。

### 2.1 基于改进遗传算法的聚类分析

改进遗传算法是一种模拟生物在自然界中的遗传和进化过程的全局最优自适应概率搜索算法,具有较强的鲁棒性和全局寻优能力<sup>[14-16]</sup>,相对于 K-均值算法,改进遗传算法更容易得到无监督聚类问题的全局最优解,但它直接用于聚类问题主要不足是收敛速度低,因此将 K-均值算法作为其基聚类算法的方式,提高其收敛速度,完成两种算法优势互补的深度融合。基于改进遗传算法聚类分析流程如图 2 所示。

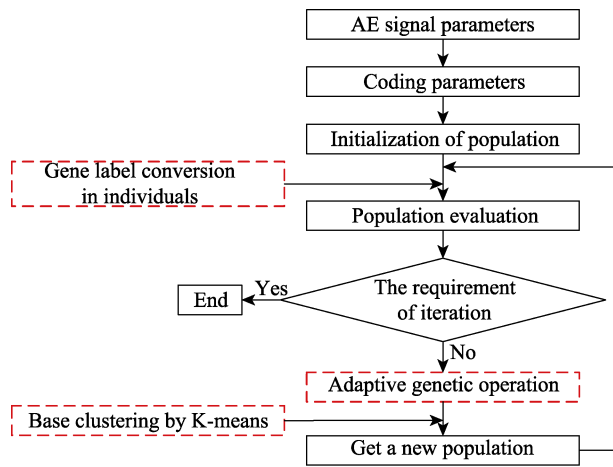


图 2 基于改进遗传算法聚类流程图  
Fig. 2 Cluster analysis process based on the improved genetic algorithm

### 2.1.1 聚类标签转化

在采用遗传算法得到最终结果之前, 必须解决基聚类的类标签不一致问题。例如对于分类结果 {1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3} 和 {2, 2, 2, 3, 3, 1, 1, 1}, 虽然两种编码方式不同, 但是表示的却是同一个划分。基聚类之间必须通过匹配建立相互的对应关系。对于本研究中有多个基聚类的聚类问题, 通过利用类中心和坐标原点的相对位置关系, 以距离原点位置由近及远给各个体中的类中心编号, 然后再将各类中心的对应元素编号修改为类中心的编号, 完成基聚类标签转换。

### 2.1.2 适应度函数及遗传操作

适应度通常用来度量群体中各个体在优化计算中可能达到或者接近最优解的优良程度。本研究采用式(1)构造适应度函数, 式(1)中的  $E$  值越小说明聚类结果越好, 因此选择如下适应度函数:

$$f = \frac{a}{1+E} \quad (1)$$

其中,  $a$  为常数,  $E$  为准则函数。

本研究中采用单点交叉、随机变异和根据个体适应度进行轮盘赌的方式进行遗传操作。标准的遗传算法在整个进化过程中交叉、变异概率都采用固定的概率值, 在进化后期由于个体竞争减弱而引起的随机搜索趋势会导致算法收敛速度缓慢和未成熟收敛<sup>[15]</sup>。为了避免以上问题, 采用自适应交叉率( $P_c$ )和变异率( $P_m$ ), 对于适应度大的个体, 赋予其相应的交叉和变异概率, 自适应的交叉和变异概率能够提供某个解最佳的  $P_c$  和  $P_m$ , 使自适应遗传算法在保持群体多样性的同时保证算法收敛<sup>[16-17]</sup>。遗传参数选择如公式(2, 3)所示:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} & f' \leq f_{avg} \\ P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' > f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} & f \leq f_{avg} \\ P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f > f_{avg} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $P_{c1}$  表示最大交叉率,  $P_{c2}$  表示最小交叉率,  $P_{m1}$  表示最大变异率,  $P_{m2}$  表示最小变异率,  $f_{avg}$  表示每一代群体的平均适应度,  $f_{max}$  表示群体中最大的适应度,  $f'$  表示要交叉的 2 个个体中较大的适应度值,  $f$  表示群体中要变异个体的适应度值。

### 2.1.3 基聚类生成机制

在运用改进遗传算法进行聚类分析之前需要生成若干有效的聚类个体, 由于 K-均值具有较强的局部搜索能力, 在改进遗传算法中选择 K-均值作为基聚类算法, 可以显著提高聚类分析的收敛速度。K-均值算法从数据集中随机选择  $k$  个声发射信号点作为初始类中心, 根据欧几里得公式计算每个声发射信号点到当前  $k$  个类中心的距离, 并根据计算得到的欧几里得距离将每个信号点分配到离其最近的类中心所在的类, 然后重新计算类中心, 直至准则函数  $E$  达到最小, 聚类结束。类中心的计算公式及准则函数如式(4, 5)所示:

$$c_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (4)$$

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |x - c_i|^2 \quad (5)$$

其中,  $x$  为声发射信号特征参数向量,  $C_i$  为第  $i$  类信号空间,  $|C_i|$  是  $C_i$  内信号点的数量,  $c_i$  为第  $i$  类的聚类中心。

### 2.2 聚类特征选择及聚类有效性评价

声发射信号特征参数是一种高维向量, 其中某些参数之间存在很强的相关性, 导致各类特征在聚类中的权重不匹配, 引起聚类结果的偏差。因此, 需要对声发射信号进行降维处理。本研究根据 Moevus 等<sup>[17-19]</sup>提出的层次聚类特征选择方法, 以每个特征为一个节点, 通过特征之间的相关系数作为节点距离表征的方式, 建立各特征之间的距离矩阵, 通过层次聚类之后特征之间距离高度率的设置, 删除冗余特征, 完成声发射聚类特征的选择。

本研究中选取 DB 和 CH 指标同时作为聚类有效性的评价指标。DB 指标用类内样本点到其聚类

中心的距离估计类内的紧致性,用聚类中心之间的距离表示类间的分离性, DB 值越小意味着类内距离越小,同时类间距离越大,即更优的聚类划分结果<sup>[20]</sup>。Milligan 等<sup>[21]</sup>对 30 多个聚类有效性指标进行了比较,认为 CH 指标性能最优, CH 指标通过计算各点与类中心的距离平方和来度量类内紧密度,通过计算各类中心与数据集中心点距离平方和来度量数据集的分散度, CH 指标越大代表类自身越紧密,类与类之间越分散,即更优的聚类结果<sup>[22]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 拉伸试验结果

2D-C/SiC 试样的应力-应变曲线及拉伸过程声发射信号能量如图 3 所示。试样断裂应变为 1.36%, 极限强度为 182.6 MPa。整个试验过程中采集到的有效声发射事件数为 4974。

#### 3.2 声发射模式识别

##### 3.2.1 聚类特征选择

声发射信号的主要特征参数包括: 上升时间、计数、能量、持续时间、幅值、平均频率和峰值频率。将所有特征参数值正则化到[0,1]范围, 建立特征参数相关矩阵。用全链接的距离度量方式进行层次聚类, 选择高度率为 20%, 将特征参数分为 4 类。层次聚类结果表明上升时间、计数、持续时间、峰值频率相似度高, 如图 4 所示。本研究从以上 4 个相似度高的特征中选取计数, 与能量、幅值、平均频率共同作为聚类分析的特征参数。

##### 3.2.2 聚类类别数的确定

在采用改进遗传算法对声发射信号进行聚类分析的过程中, 选择交叉概率  $P_{c1}=0.9$ ,  $P_{c2}=0.4$ , 变异概率  $P_{m1}=0.01$ ,  $P_{m2}=0.001$ ,  $a=1000$ 。聚类结果的 CH、

DB 指标随  $K$  值的变化趋势如图 5 所示。由各指标定义可知,  $K=5$  时聚类结果最优。

图 6 是声发射信号聚类结果( $K=5$ ), 可以看出, 不同聚类的重叠较少, 类与类之间具有较明显的差异。

以往的研究表明, C/SiC 复合材料拉伸破坏过程存在基体开裂、界面失效、层间剥离、纤维断裂等损伤模式<sup>[10-12]</sup>, 从图 7 所示的试样断口形貌中也可发现这些损伤模式。考虑到纤维断裂存在着单丝纤

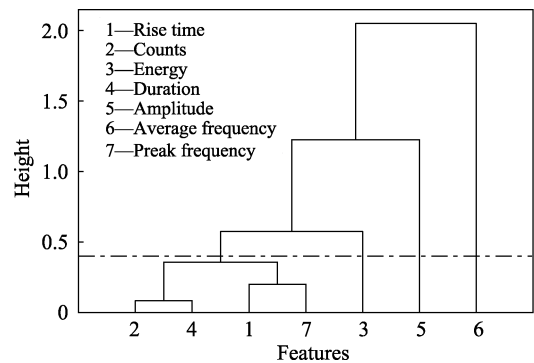


图 4 声发射信号参数相关树状图

Fig. 4 Correlation dendrogram of the AE features

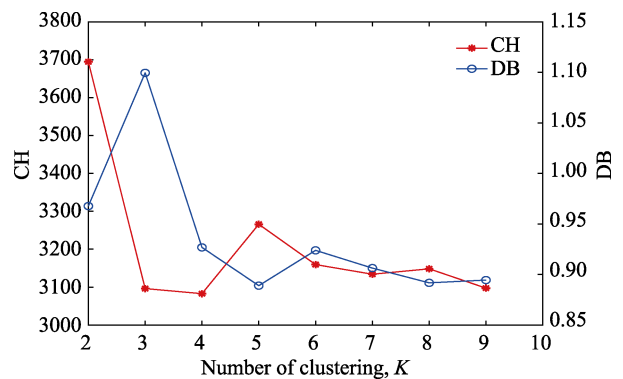


图 5 CH 指标和 DB 指标随  $K$  值变化曲线

Fig. 5 CH&DB index change curves with  $K$  value of C/SiC specimen

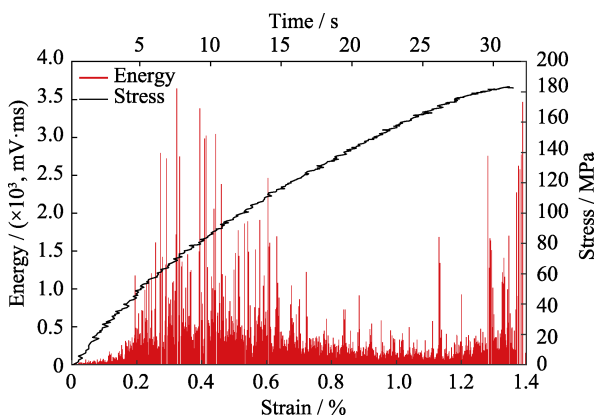


图 3 应力-应变曲线及声发射信号能量分布

Fig. 3 Stress-strain curve and energy distribution of acoustic emission signal in tensile process

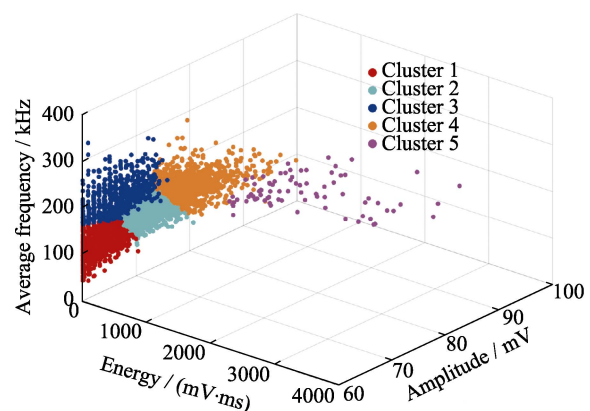


图 6 声发射信号聚类结果分布

Fig. 6 Distribution of clustering results of acoustic emission signals



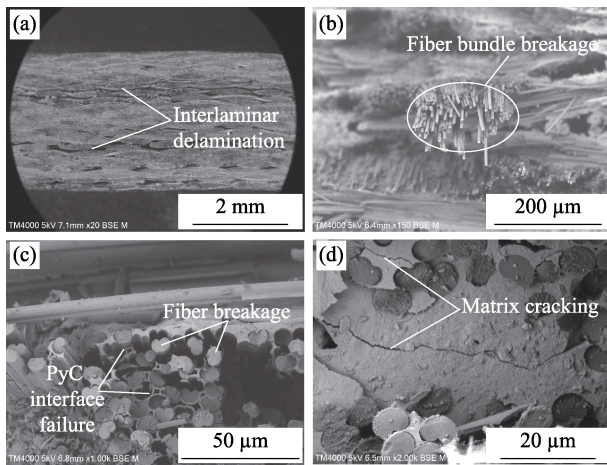


图 7 试样的断口 SEM 照片

Fig. 7 Fracture SEM images of specimen

(a) Interlaminar delamination; (b) Fiber bundle breakage; (c) Fiber breakage & PyC interface failure; (d) Matrix cracking

维断裂和纤维束整体断裂两种形式, 因此可以认为存在 5 种微观断裂机制, 这与基于改进遗传算法所获得的声发射信号最优聚类数是一致的。

### 3.2.3 损伤模式识别

声发射损伤模式识别是建立上述材料内各种微观断裂机制和声发射聚类之间的对应关系<sup>[23-24]</sup>, 这需要对声发射特征与断裂事件物理特性的相关性进行分析。在无监督聚类中依赖各种断裂机制, 每一类声发射特征以各聚类类中心的声发射参数值表示, 如表 1 所示。在声发射信号的特征参数中, 声发射能量和平均频率是能够反映声发射事件物理机制的最重要的两个参数。声发射能量值与其断裂源释放的应变能正相关, 而声发射频率值很大程度上取决于断裂源的材料属性<sup>[9]</sup>。因此, 采用声发射能量及频率特征作为识别声发射信号断裂机制的主要依据。

表 1 中聚类 1 的各个声发射参数都最低, 表明这种断裂机制释放的应变能非常小, 是典型的脆性断裂特征, 考虑到 C/SiC 复合材料基体脆性及低应力开裂的特点, 聚类 1 对应基体裂纹产生和扩展。聚类 5 的各个参数都最高, 表明这种断裂机制释放

表 1 聚类中心声发射参数值

Table 1 Numerical values of the clustering centers

Cluster	Count	Energy/ (mV·ms)	Amplitude/ mV	Average frequency/ kHz	Damage mode
1	182	28	63	112	Matrix cracking
2	596	90	71	136	Interface failure
3	303	42	66	189	Fiber breakage
4	1463	237	77	167	Interlaminar delamination
5	10703	1628	82	188	Fiber bundle breakage

了较大的应变能, 参与这类断裂事件的组份材料应当具有较好的韧性, 符合 C 纤维的特征, 并且它的计数也非常多, 这是纤维束内数百根纤维持续断裂造成的, 因此可以推断聚类 5 属于纤维束断裂机制。聚类 3 的频率特征和聚类 5 接近, 表明它们是同一种材料的断裂行为, 但聚类 3 的能量要比聚类 5 低得多, 说明聚类 3 是单丝或者零星纤维断裂事件。在材料拉伸过程中, 基体微裂纹扩展至纤维, 由于纤维对裂纹的阻碍作用, 裂纹开始沿着纤维界面和层间基体扩展, 引发界面脱粘和层间剥离等损伤。通过上面的分析, 聚类 2 和聚类 4 代表上述两种界面损伤形式。纤维基体界面和层间相比, 界面较弱, 损伤面积更小, 释放应变能的能力较弱, 其声发射信号的能量、频率等参数更小。因此, 可以判定聚类 2 对应界面损伤, 聚类 4 对应层间剥离。

### 3.3 材料损伤演化分析

大量的研究将 C/SiC 复合材料的拉伸失效过程划分为损伤起始、损伤加速和损伤稳定三个阶段<sup>[25-29]</sup>。在加载初期, 应力-应变曲线呈线性特征, 几乎没有损伤发生; 随着加载的进行, 初始缺陷及裂纹开始增长并扩展, 导致纤维和基体之间的界面产生脱粘, 材料模量逐渐降低, 材料的应力-应变曲线表现出非线性特征; 当拉伸应力达到一定值后, 大量初始裂纹的扩展结束, 裂纹密度达到饱和, 损伤进入稳定发展期, 应力-应变曲线再次表现出近似线性的特征<sup>[28-29]</sup>。

图 8、图 9 分别是在声发射模式识别的基础上, 得到的拉伸过程中各类损伤模式声发射累积能量和累积事件数的演化过程。图 10 分别为基体开裂、界面损伤、纤维断裂、层间剥离和纤维束断裂 5 种损伤模式在拉伸过程中的声发射信号能量分布, 可以看出整个加载过程可以划分为 4 个阶段。

第一阶段(0~48 MPa): 一般认为存在损伤起始

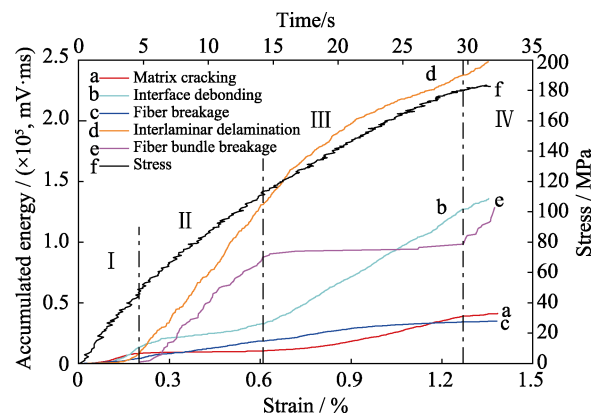


图 8 累积能量随应变和时间的变化

Fig. 8 Accumulated energy with strain and time

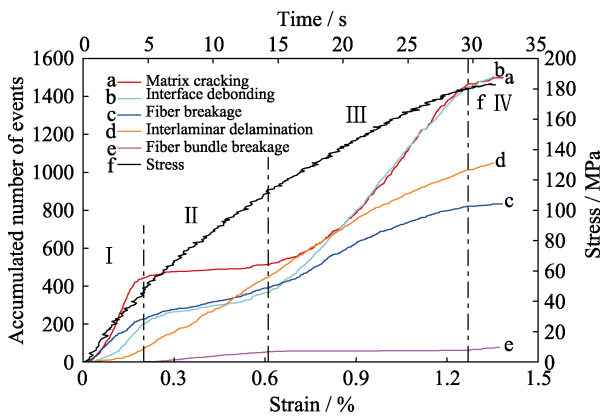


图 9 累积事件数随应变和时间的变化  
Fig. 9 Accumulated number of AE events with strain and time

阶段<sup>[25]</sup>, 但通过声发射研究方法, 即使在损伤起始阶段仍有明显的微观断裂事件。此阶段声发射事件以基体微裂纹扩展、热解炭界面损伤和单丝纤维断裂等低能声发射信号为主。C/SiC 复合材料在制备过程中会产生热应力, 同时微结构内的孔隙也会成为裂纹源<sup>[30-31]</sup>, 并在较低应力下扩展。加载开始时, 材料残余热应力释放, 当局部应力超过 SiC 基体的承载能力后, SiC 基体孔隙作为裂纹源产生微裂纹并扩展, 同时随着应力的增大, 在低强度的 SiC 区域开始出现基体裂纹<sup>[32]</sup>。由于纤维对基体微裂纹扩展有阻隔作用, 裂纹沿着界面产生偏转, 发生界面脱粘<sup>[30]</sup>, 如图 7(c)所示。同时纤维束中少量

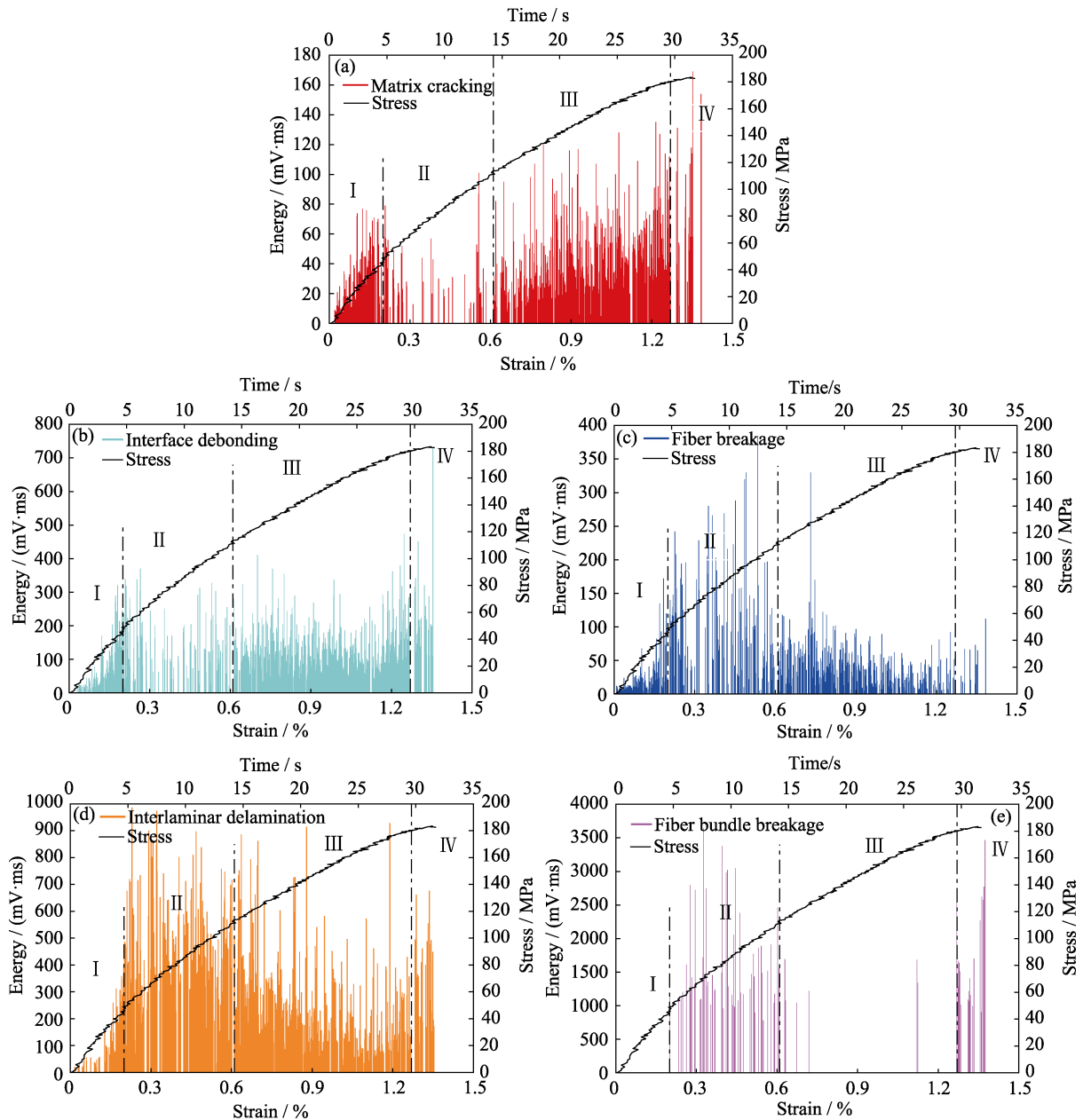


图 10 拉伸过程中各类损伤的能量分布  
Fig. 10 Energy distributions of different damage modes during the tensile test  
(a) Matrix cracking; (b) Interface debonding; (c) Fiber breakage; (d) Interlaminar delamination; (e) Fiber bundle breakage

较弱的纤维丝发生断裂。

第二阶段(48~112 MPa): 声发射事件以高能声发射信号激增为主, 而基体开裂事件和界面脱粘事件非常少, 表明进入裂纹饱和阶段。在二维编织复合材料中, 编织节点处由于纤维束之间的挤压作用, 一般容易产生孔洞型的缺陷, 容易引发基体裂纹汇聚, 使编织节点的纤维束产生应力集中<sup>[28]</sup>。在裂纹饱和区域, 纤维及纤维束作为拉伸载荷的主要承载对象<sup>[32-33]</sup>, 应变能更多地通过纤维及纤维束断裂来释放, 部分纤维同时开始发生断裂, 声发射能量较第一阶段更高(图 10(c)), 并开始出现纤维束断裂的声发射事件(图 10(e))。从图 7(b)中可以看出, 纵向纤维束在编织节点断裂, 而且伴有明显的纤维拔出。此外, 这一时期由于纤维和纤维束对基体裂纹扩展的阻碍作用, 在纵横纤维束交叉区域产生裂纹<sup>[28]</sup>, 并开始沿着纤维及纤维束纵向发展<sup>[26]</sup>, 产生较多的层间剥离。从图 7(a)中可以看到层间剥离多数发生在纤维束的交叉区域。纤维束拔出过程产生的界面滑移、纤维束断裂以及大量层间剥离, 造成材料的弹性模量在此阶段逐渐降低, 这与已有的对材料损伤加速阶段的认识较为一致。

第三阶段(112~180 MPa): 几乎停止发生纤维束断裂事件, 持续发生其他损伤。这是由于在第二阶段微裂纹饱和区域纤维及纤维束作为承载部分发生大量断裂; 随着应力的增大, 在该阶段纤维断裂区域, 基体部分开始作为承载对象, 在由微裂纹扩展形成基体长裂纹的同时<sup>[27]</sup>, 在富基体区域也开始形成基体裂纹<sup>[34]</sup>, 如图 7(d)所示。随着基体长裂纹扩展, 界面脱粘也持续增加, 能量耗散主要依靠裂纹和脱粘形成的表面能以及纤维拔出的摩擦, 几乎不发生纤维束断裂。

第四阶段(180~183 MPa): 材料进入破坏期, 材料达到最大形变量, 基体、界面、层间、纤维持续破坏, 各类损伤的声发射事件持续发生, 纤维束断裂事件再次出现, 材料进入严重损伤期, 直至试件断裂。通常的研究并未识别出此阶段, 而将应力-应变曲线的最高点作为材料破坏的标志。但从声发射分析的角度看, 材料的宏观失效应当在之前就发生了。

上述研究表明, 利用声发射模式识别方法并结合断口分析较单纯利用应力-应变关系能够更加准确地描述失效过程中各类损伤机制的演化过程。研究发现: 基体裂纹扩展与纤维束的断裂事件在整个拉伸试验过程中交替发生, 界面失效和层间开裂在整个过程中持续发生; 加载的初期和后期, 均存在基体裂纹扩展, 但早期以微裂纹扩展为主, 后期为长裂纹扩展为主, 中间则经历了裂纹饱和阶段; 在

达到最大应力前就已经发生材料宏观断裂, 根据声发射分析定义的极限强度和断裂应变为 180.3 MPa 和 1.27%, 略低于根据宏观应力-应变曲线得到的结果, 能够更准确地反映材料的性能。

## 4 结论

1) 通过层次聚类法筛选出幅值、能量、平均频率和计数 4 个声发射信号特征, 采用基于改进遗传算法的无监督聚类分析识别了 2D-C/SiC 复合材料拉伸过程中的基体开裂、界面层损伤、纤维断裂、层间剥离和纤维束断裂等损伤模式及其演化规律。

2) 通过对不同损伤模式声发射累积事件数、累积能量以及能量分布的分析, 发现 C/SiC 复合材料损伤发展可以分为 4 个阶段: 基体微裂纹和界面失效为主的初始损伤阶段, 基体微裂纹停滞导致层间剥离、纤维失效占主导地位的裂纹饱和阶段, 基体长裂纹和界面失效为主的损伤积累发展期, 纤维束大量失效的宏观断裂阶段。

3) 通过声发射模式识别, 可以更准确地定义材料拉伸裂纹饱和应力、拉伸极限强度和断裂应变等性能指标。

## 参考文献:

- [1] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Composites Science and Technology*, 2004, **64**(2): 155-170.
- [2] CHRISTIN F. Design, fabrication, and application of thermostructural composites (TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites. *Advanced Engineering Materials*, 2002, **4**(12): 903-912.
- [3] ZHANG LITONG, CHENG LAIFEI. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber ceramic matrix composites. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, **24**(2): 1-6.
- [4] MORSCHER G N, MAILLET E. Nondestructive evaluation - use of acoustic emission for CMCs. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, **5**: 308-324.
- [5] ZARIF KARIMI N, MINAK G, KIANFAR P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission. *Composite Structures*, 2015, **131**: 107-114.
- [6] MAILLET E, BAKER C, MORSCHER G N, et al. Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, **75**: 77-83.
- [7] MORIZET N, GODIN N, TANG J, et al. Classification of acoustic emission signals using wavelets and random forests: application to localized corrosion. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, **70-71**: 1026-1037.
- [8] MEI HUI, SUN YUYAO, ZHANG LIDONG, et al. Acoustic emission characterization of fracture toughness for fiber reinforced ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, 2013, **560**: 372-376.
- [9] MOMON S, GODIN N, REYNAUD P, et al. Unsupervised and

- supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, **43(2)**: 1–260.
- [10] TONG XIAOYAN, ZHANG JIALI, YAO LEIJIANG, *et al.* Cluster analysis of acoustic emission signals of 2D-C/SiC under tensile loading. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2014, **35(2)**: 109–114.
- [11] HUANG XIPENG, WANG BO, YANG CHENGPENG, *et al.* Evaluating damage evolution of three-dimension needled C/SiC composite based on acoustic emission signal analysis. *Journal of Inorganic Materials*, 2018, **33(6)**: 609–616.
- [12] HUANG XIPENG, WANG BO, YANG CHENGPENG, *et al.* Damage evolution of C/SiC composite materials with different densities based on acoustic emission signal analysis. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, **36(2)**: 425–433.
- [13] HARTIGAN J A, WONG M A. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1979, **28(1)**: 100–108.
- [14] HOLLAND J H.. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *Siam Journal on Computing*, 1973, **2(2)**: 88–105.
- [15] TANG WENYAN. Research and Application of Genetic Algorithm in Structural Optimization. Dalian: Doctoral Thesis of Dalian University of Technology, 2002.
- [16] REN ZIWU, SAN YE. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification. *Journal of System Simulation*, 2006, **18(1)**: 41–43.
- [17] MOEVUS M, GODIN N, R'MILI M, *et al.* Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC<sub>p</sub>/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology*, 2008, **68(6)**: 1258–1265.
- [18] ANASTASSOPOULOS A A, PHILIPPIDIS T P. Clustering methodology for the evaluation of acoustic emission from composites. *Journal of Acoustic Emission*, 1995, **13(1/2)**: 11–22.
- [19] ANASTASSOPOULOS A A, PHILIPPIDIS T P, PAIPETIS S A. Failure mechanism identification in composite materials by means of acoustic emission: Is it possible. *Nondestructive testing*, 1996: 143–149.
- [20] DAVIES D L, BOULDIN D W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979, **1(2)**: 224–227.
- [21] MILLIGAN G W, COOPER M C. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika*, 1985, **50(2)**: 159–179.
- [22] CALINSKI T, HARABASZ J. A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics*, 1974, **3(1)**: 1–27.
- [23] LI L, LOMOV S V, XIONG Y, *et al.* Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2014, **116(1)**: 286–299.
- [24] ECH-CHOUDANY Y, ASSARAR M, SCIDA D, *et al.* Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates. *Applied Acoustics*, 2017, **123**: 123–132.
- [25] YANG CHENGPENG, JIAO GUIQIONG, WANG BO. Uniaxial tensile stress-strain behavior and strength of plain woven C/SiC composite. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, **43(2)**: 330–337.
- [26] GUAN GUOYANG, JIAO GUIQIONG, ZHANG ZENGGUANG. Uniaxial macro-mechanical property and failure mode of a 2D-woven C/SiC composite. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, **22(4)**: 81–85.
- [27] CHANG YANJUN, JIAO GUIQIONG, TAO YONGQIANG, *et al.* Damage behavior of 2.5D-C/SiC composites under tensile loading. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, **23(3)**: 509–514.
- [28] MEI HUI, CHENG LAIFEI, ZHANG LITONG, *et al.* Damage evolution and microstructural characterization of a cross-woven C/SiC composite under tensile loading. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, **35(2)**: 137–143.
- [29] WANG M, LAIRD C. Characterization of microstructure and tensile behavior of a cross-woven C/SiC composite. *Acta Materialia*, 1996, **44(4)**: 1371–1387.
- [30] FANG PENG, CHENG LAIFEI, ZHANG LITONG, *et al.* Acoustic emission characteristics of C/SiC composite during tensile test. *Nondestructive Testing*, 2006, **28(7)**: 358–361.
- [31] QIAO SHENGRU, DU SHUANGMING, JI GANGCHANG, *et al.* Damage mechanism of 3D-C/SiC composite. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, **26(3)**: 307–312.
- [32] NIE J, XU Y, ZHANG L, *et al.* Microstructure and tensile behavior of multiply needled C/SiC composite fabricated by chemical vapor infiltration. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209(1)**: 572–576.
- [33] WANG YIQIANG, ZHANG LITONG, CHENG LAIFEI. Effects of heat treatment on the tensile behavior and damage evolution of a 3D C/SiC composite. *International Journal of Modern Physics B*, 2010, **24(15/16)**: 2591–2596.
- [34] LI L B, SONG Y D, SUN Y C. Modeling the tensile behavior of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composites. *Mechanics of Composite Materials*, 2015, **51(3)**: 359–376.