

基于声发射信号的三维针刺 C/SiC 复合材料 拉伸损伤演化研究

黄喜鹏¹, 王波², 杨成鹏¹, 潘文革¹, 刘小瀛³

(西北工业大学 1. 力学与土木建筑学院, 西安 710129; 2. 航空学院, 西安 710072; 3. 超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072)

摘要: 本研究对三维针刺 C/SiC(3-dimension needled C/SiC, 3D-N C/SiC)复合材料进行室温单调拉伸和拉伸加载-卸载试验, 利用声发射技术对试样损伤演化进行动态监测。采用 K-均值聚类分析方法对小波降噪后的声发射信号进行了损伤模式识别, 结合试样断口扫描电镜观测, 发现 3D-N C/SiC 复合材料在拉伸载荷作用下主要存在五类损伤模式: 基体开裂、界面脱粘、界面滑移、纤维断裂和纤维束断裂。通过快速傅里叶变换(FFT)方法对小波降噪后的信号进行频谱分析得出: 3D-N C/SiC 复合材料在拉伸载荷作用下主要存在 240、370 和 455 kHz 三种频率的损伤信号, 分别对应于界面损伤、基体损伤和纤维损伤。结合单调拉伸试验过程声发射信号能量柱分布和加卸载过程累积能量曲线特征, 分析了试样损伤演化机理。

关键词: C/SiC 复合材料; 声发射; 聚类分析; 损伤机理

中图分类号: TB332 文献标识码: A

Evaluating Damage Evolution of Three-dimension Needled C/SiC Composite Based on Acoustic Emission Signal Analysis

HUANG Xi-Peng¹, WANG Bo², YANG Cheng-Peng¹, PAN Wen-Ge¹, LIU Xiao-Ying³

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Static tensile test of three dimension needled C/SiC composite material (3D-N C/SiC) was carried out at room temperature and damage processes of the composite was monitored online by an acoustic emission (AE) instrument. Noise information in the AE signals was removed according to Wavelet theory, and K-means clustering was used to analyze the AE signals. Combined with SEM observation, five damage modes were found during the tension: matrix cracking, interfacial debonding, interfacial sliding, individual fiber breakage, and fiber bundle rupture. The damage signal of 3D-N C/SiC composite contained three main frequencies at 240, 370 and 455 kHz, corresponding to interface damage, matrix damage and fiber fracture, respectively. Damage evolutionary mechanism was proposed through AE events and cumulative energy variation with loading time.

Key words: C/SiC composite; acoustic emission; K-means cluster; damage mechanism

收稿日期: 2017-08-07; 收到修改稿日期: 2017-11-09

基金项目: 超高温结构复合材料重点实验室创新基金(6142911050116); 国家自然科学基金(51275422)

Creative Research Foundation of Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory (6142911050116); Natural Science Foundation of China (51275422)

作者简介: 黄喜鹏(1994-), 男, 硕士研究生. E-mail: huangxp_nwpu@163.com

通讯作者: 王波, 副教授. E-mail: b.wang@nwpu.edu.cn

连续纤维增韧 C/SiC 陶瓷基复合材料具有高比强度、高比模量、抗腐蚀、抗氧化和耐高温等特点,在航空、航天以及民用领域都有着广泛的应用^[1-2]。三维针刺 C/SiC (3D-N C/SiC)复合材料解决了二维叠层 C/SiC 复合材料层间力学性能弱的问题,且面内纵横方向上纤维等量分布,力学性能呈宏观各向同性,克服了 3D-N C/SiC 复合材料力学性能存在明显的各向异性的缺点。由于针刺工艺简单、易于实现自动化且成本低,并能制备大型复杂异型构件,在飞行器热防护系统、固体火箭发动机喉衬和喷管扩张段以及先进刹车系统等领域有广阔的应用前景^[3-4]。目前,对于 3D-N C/SiC 复合材料的研究主要集中于材料参数对其性能的影响以及本构模型的建立,缺乏对材料损伤演化机理和损伤表征方面的研究^[5-6]。

声发射(Acoustic Emission, AE)技术可以实时连续地对材料内部缺陷或损伤的发展进行监测,反映损伤产生和扩展的过程^[7-8]。声发射信号复杂,材料各类型损伤的声发射特征不明显,将声发射信号与损伤类型直接关联具有较大的困难^[9]。常岩军等^[10]利用声发射信号频谱特征、相对能量值以及幅值识别了 3D C/SiC 复合材料的拉伸损伤模式,但对材料损伤演化机理的描述缺少可靠性依据。国内外研究表明,采用 K-聚类分析方法能够对材料声发射信号进行损伤类别识别。Momon 等^[11]采用聚类分析方法得出了 C/SiC 复合材料在高温环境(700~1200℃)下的损伤模式;童小燕等^[12]采用 K-聚类算法对 2D C/SiC 复合材料室温拉伸试验的声发射信号特征参数进行了研究。但尚未见到将 K-聚类算法用于 3D-N C/SiC 复合材料的拉伸声发射信号的分析。

本研究针对 3D-N C/SiC 复合材料试样进行室温拉伸试验,测得材料的基本力学性能,并采用声发射监测技术采集试验过程中损伤声发射信号。采用小波包分析降低信号中的噪声信号含量,对降噪后的声发射信号采用 K-聚类分析方法识别材料在拉伸试验中的损伤模式。通过快速傅里叶变换(FFT)对声发射信号进行频谱分析,结合拉伸试验过程能量柱分布和加载-卸载过程累积能量特征,研究材料的损伤演化机理,为深入研究 3D-N C/SiC 复合材料损伤断裂行为提供依据。

1 实验方法

1.1 材料

复合材料试样主要组分材料包括 T-300 碳纤维、热解碳(PyC)界面和 SiC 基体,将由连续纤维制

成的单层 0°无纬布、短纤维胎网、90°无纬布、胎网依次循环叠加到预定厚度后,采用接力式针刺技术将胎网中的纤维垂直的引入到无纬布层间,使各铺层之间形成一个整体,得到三维针刺增强预制体^[6,13]。在预制体表面沉积热解碳(PyC)界面层,之后沉积 SiC 基体,然后制备得到 3D-N C/SiC 复合材料板。试样中孔隙率约为 15%,纤维体积分数约为 40%。0°无纬布、90°无纬布、胎网层以及针刺纤维如图 1 中所示。可见,各无纬布之间通过胎网层中的短纤维连接在一起。

1.2 试验过程

常温单调拉伸试验采用位移控制加载,加载速率为 0.3 mm/min。拉伸加卸载试验采用载荷控制加载,应力每增加 12 MPa 进行一次加卸载循环。试验全程采集载荷和应变数据。采用 MISTRAS-2001 声发射系统对试样进行全程实时监测。探头型号为 R15,前置放大器增益为 40 dB,主板增益为 20 dB,采样频率为 10 MHz,带通滤波为 100~400 kHz,门槛值为 40 dB。试样尺寸及试验中加强片黏贴位置、应变片黏贴位置和声发射探头安装位置如图 2 所示。

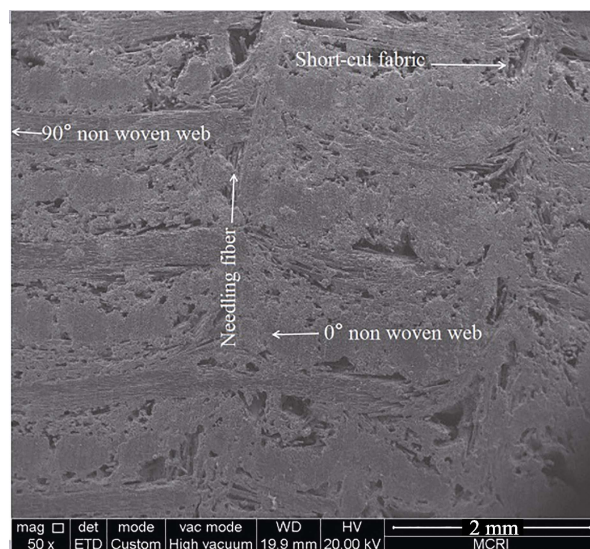


图 1 3D-N C/SiC 横截面显微照片

Fig. 1 Micrograph of 3D-N C/SiC sample cross-section

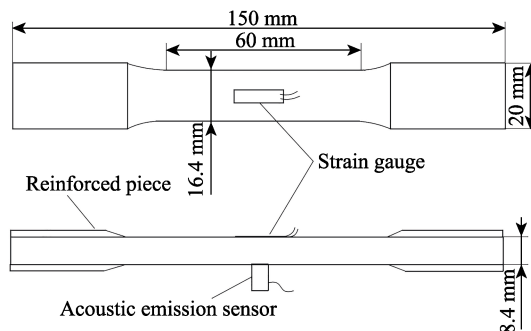


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic drawing for sizes of tensile sample

1.3 测试表征

材料中局部源能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象称为声发射。试验过程中采用单探头采集的声发射信号含有低频率、非平稳的环境噪声信号,可采用 Mallat 提出的小波分解与重构的快速算法降低信号中噪声的含量,减小分析误差^[14]。

根据声发射信号参数将声发射信号数据进行类型识别,研究 3D-N C/SiC 复合材料在拉伸载荷作用下的损伤机理,要把声发射信号数据分成 K 个类别。相应地,需要找出 K 个中心点 $\{\mu_k\}_{k=1}^K$ 。同时,对于数据 $D = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$, 定义一个类别指示变量 $\{r_{nk} | r_{nk} \in \{0, 1\}\}$, 表示 $x_n (n \in \{1, 2, 3, \dots, N\})$ 是否属于第 k 个中心点的类,属于时取值为 1, 否则取值为 0。由此定义数据点属于离该点最近的中心点的类。 r_{nk} 的表达式为:

$$r_{nk} = \begin{cases} 1, k = \arg \min_j \|x_n - \mu_j\| \\ 0, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

定义每个数据点到其中心点的距离(或距离的平方)之和为目标函数(或决定函数),表达式为:

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|x_n - \mu_n\|^2 \quad (2)$$

声发射信号的产生是材料或结构的某个局部损伤区域或整体,受外力或内应力作用发生破坏或载荷快速卸载时,其内部应变能以瞬态弹性波的形式得到释放的结果。声发射信号的频谱范围与载荷卸载速率有关。文献报道^[15-16], 卸载速率越快,信号频谱中的频率信息就越高。载荷卸载速率与材料相关。通常采用快速傅里叶变换(FFT)对声发射信号进行频谱分析,研究典型损伤时声发射信号的频谱特征;并结合 K -均值聚类分析结果和试验断口 SEM 照片进行损伤模式识别和损伤演化机理研究。

2 结果与讨论

2.1 基本力学性能

试验测得 3D-N C/SiC 复合材料拉伸试验应力-应变曲线如图 3 所示,试验曲线整体表现为明显的非线性,可分为三个阶段:初始加载线性区(0~37 MPa)、中间阶段非线性区(37~89 MPa)以及最后的准线性区(89~123 MPa)。应力-应变曲线的这种非线性与试样在加载过程中损伤的产生、发展和累积有关^[17]。图 4 为 3D-N C/SiC 复合材料在循环拉伸载荷下应力-应变曲线,曲线与单调拉伸应力-应变曲线具有相同的非线性特征:在应力水平未达到比

例极限($\sigma_e \approx 37$ MPa)时,加卸载曲线重合,没有残余应变和迟滞现象;应力水平逐渐增大后,卸载残余应变逐渐增大,迟滞现象逐渐明显。表 1 为 3D-N C/SiC 复合材料基本力学性能测试结果。

2.2 声发射信号基本特征

室温单向拉伸试验应力-应变曲线和声发射信号能量柱分布结果如图 3 所示,声发射事件主要集中于非线性区,且高能量信号(>50 mV·ms)主要集中于最后的准线性区。常岩军等^[10]通过试验研究表明,声发射事件中高幅高能量信号出现的时间和频数与 C/SiC 复合材料性能高低相关:在加载前期(应变低于断裂应变的 15%)损伤较少是材料具有高强度的必要条件。在此次试验过程中,加载前期发生了能量较高、幅值较大的声发射事件,即在加载前期,试样中就出现了较为明显的损伤,使得试验测得的 3D-N C/SiC 复合材料拉伸强度较低。

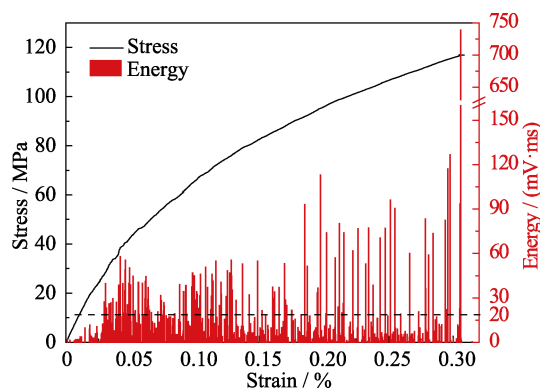


图 3 3D-N C/SiC 应力-应变曲线和声发射信号能量分布
Fig. 3 Stress-strain curve and AE energy distribution during monotonic tension for the 3D-N C/SiC composite

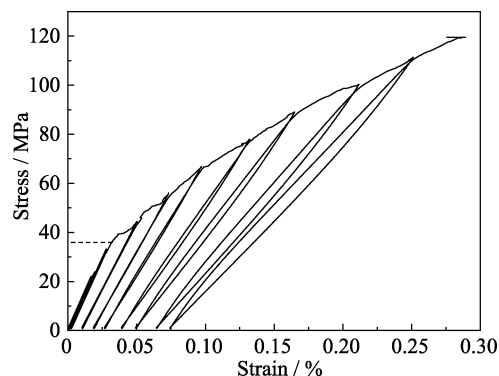


图 4 3D-N C/SiC 拉伸加卸载应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curve of 3D-N C/SiC during cyclic loading-unloading-reloading procedure

表 1 3D-N C/SiC 复合材料拉伸基本力学性能
Table 1 Tensile mechanical properties of 3D-N C/SiC

Modulus/ GPa	Strength/ MPa	Failure strain/%	Elastic limit/MPa	Poisson's ratio
104.29	115.06	0.3061	37.67	0.08

图 5 为 3D-N C/SiC 复合材料在拉伸加卸载试验中声发射事件能量和累积能量特征,从图中可以看出,在应力水平超过 37 MPa 之后,声发射事件数明显增多,在卸载初期仍有声发射事件发生,具有明显的费利西蒂(Felicity)效应^[18]。在应力水平大于 89 MPa 后的卸载过程中,声发射信号能量明显增大。李潘等^[19]通过大量的试验和有限元模拟证明:材料在加卸载过程中的迟滞现象是由界面剪切阻力 τ (阻碍纤维与基体之间相互滑移的作用力)的作用而产生的。结合图 5 发现,3D-N C/SiC 复合材料在加载前期就出现了界面脱粘和界面滑移的损伤模式。

2.3 K-均值聚类信号分析

由于(2)式不是凸函数,因此不能保证算法会收敛到一个全局最优值,只能保证收敛到一个局部最优值。采用目标函数值 J 的正则化结果 \hat{J} 来决定数据点的聚类区域。图 6 为 \hat{J} 随 K 值变化的趋势图,在 1~10 上未迭代得到一个最优的 K 值,但相对而言, $K=5$ 的时候收敛效果较好且计算时间较短。

选取聚类类别数 $K=5$ 时,对 3D-N C/SiC 复合材料声发射信号的能量和幅值进行 K-聚类分析,结果如图 7 所示。由聚类算法得到 3D-N C/SiC 复合材料

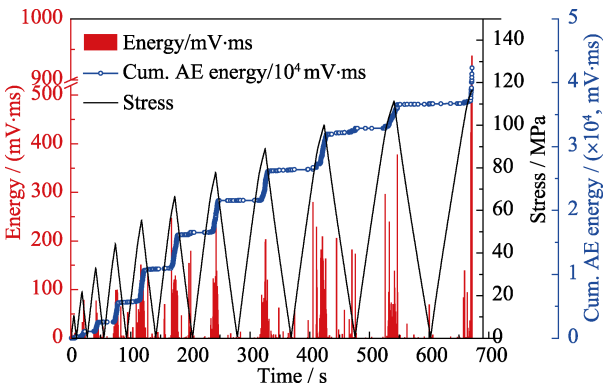


图 5 3D-N C/SiC 拉伸加卸载过程中声发射特征
Fig. 5 Acoustic emission feature during cyclic loading- unloading-reloading procedure

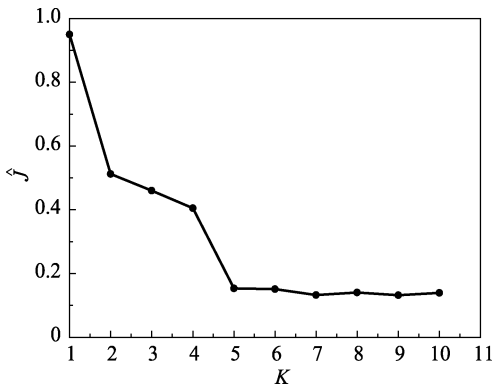


图 6 目标函数 \hat{J} 值随 K 值变化曲线
Fig. 6 \hat{J} index change with clustering number K

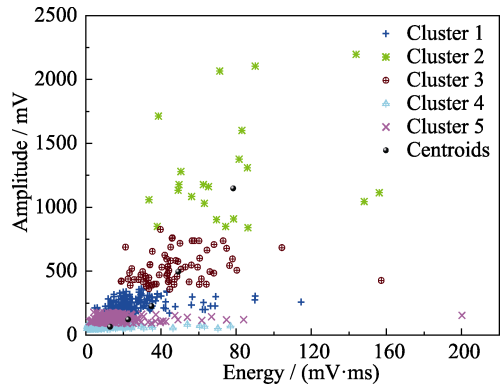


图 7 幅值对能量聚类结果分布图
Fig. 7 Clustering chart of amplitude vs. energy distribution

在拉伸载荷作用下存在的 5 种损伤模式,且图 7 表明:根据声发射信号能量值和幅值能够将 3D-N C/SiC 复合材料损伤信号进行分类,各聚类之间存在明显的区别,各类样点之间几乎无重叠,能够有效识别损伤类型。聚类中心点坐标如表 2 所示,可用聚类中心的各参数值代表各种损伤模式下声发射信号的数字特征^[20-21]。

根据 K-均值聚类算法的聚类结果,将声发射信号与试验应力-时间曲线相关联,结果如图 8(a)所示。按照损伤信号能量特征以及各类损伤信号出现的时间次序,将整个损伤过程分为 5 个区间: I 区主要由初始线性阶段组成,只存在能量较低的 Cluster 1 损伤信号; II 区和 III 区主要位于非线性阶段内,其中, II 区中 Cluster 1 损伤信号较为密集,且低能量的 Cluster 5 损伤信号随载荷增大逐渐增多,在 III 区中存在 3 类损伤信号,较 II 区增加了能量非常低的 Cluster 4 损伤信号; IV 区和 V 区主要位于准线性阶段内,载荷进入 IV 区后,能量较高的 Cluster 3 损伤信号出现,该类损伤信号数量较少,载荷进入 V 区后,出现能量非常大的 Cluster 2 损伤信号,直至材料失效。5 类损伤模式随载荷增加依次出现,且各类损伤信号能量按梯度分布。

2.4 损伤演化分析

将 3D-N C/SiC 复合材料简化为层间增强的正交层合陶瓷基复合材料,则失效过程可离散为单向纤维增强陶瓷基复合材料的失效过程,其中,单向结构陶瓷基复合材料的失效过程离散为基体损伤、界面损伤、纤维断裂等几种占主导地位细观失效模

表 2 聚类中心坐标值					
Table 2 Numerical value of the clustering center					
Cluster	1	2	3	4	5
Amplitude/mV	226.4	1147.5	496.2	64.4	122.5
Energy/(mV.ms)	34.2	78.4	49.0	12.5	22.0

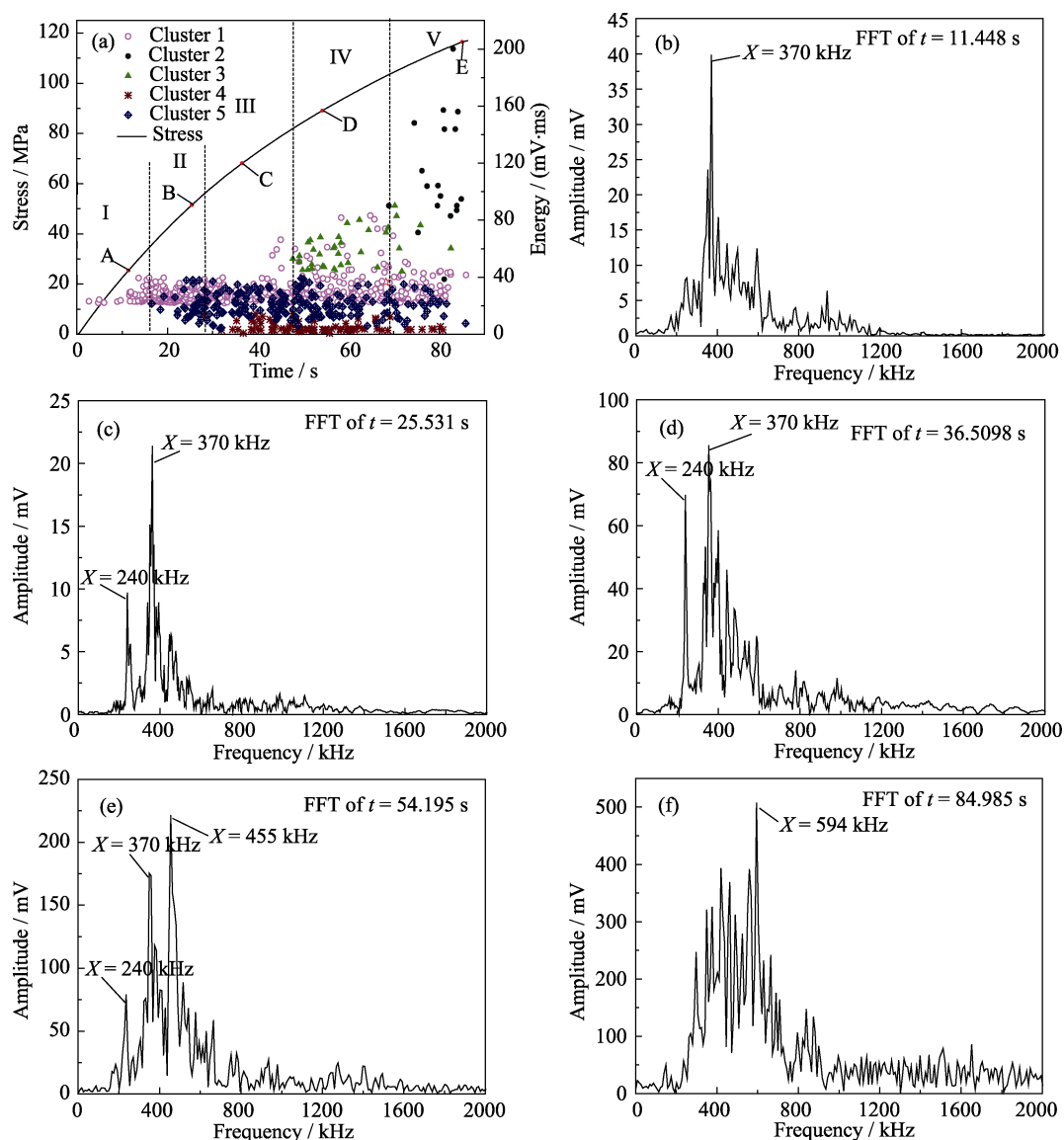


图8 3D-N C/SiC 声发射事件随应力分布及特征点信号波频谱特征
Fig. 8 Characteristics of acoustic emission events with stress distribution in 3D-N C/SiC (a) and spectral characteristics of the signal wave at point A (b), B (c), C (d), D (e) and E (f) in (a)

式控制的阶段。结合应力-时间曲线和声发射信号特征,在图8(a)中5个区间中选择5个特征点(A点、B点、C点、D点和E点),分别对特征点的声发射信号波进行频谱分析。

点A($t=11.448$ s)位于I区,声发射事件数较少,此时声发射信号波的频谱特征如图8(b)所示,此时的信号中只有一个频率(~ 370 kHz),对应的幅值较大。图8(a)表明:在A点主要存在Cluster 1对应的声发射事件,信号能量主要集中在20~40 mV·ms。3D-N C/SiC 复合材料是由SiC基体与碳纤维材料采用CVI方法制备而成。由于SiC基体与碳纤维热膨胀系数的差异,从制备温度冷却至室温时的材料内部存在热残余应力^[22],基体中存在初始微裂纹,且纤维与基体之间存在界面压力。在热残余应力和前

期拉伸载荷作用下,90°层中基体微裂纹逐渐扩展,释放少量能量约为20 mV·ms的声发射信号,对材料性能影响微弱,应力-应变曲线基本呈线性;随着载荷继续增加,由于界面压力和低性能界面相,使得微裂纹沿纤维逐渐扩展为基体损伤裂纹^[23],如图10所示,释放出20~40 mV·ms的声发射信号(A点)。试样断口SEM照片图9(a)表明材料90°层沿着纤维方向发生断裂,证明了演化分析的合理性。

3D-N C/SiC 复合材料试样拉伸加卸载的卸载模量和残余应变随卸载应力水平变化曲线如图11中所示。当应力水平小于 $\sigma_s(33.2$ MPa)时,卸载模量基本无变化,残余应变很小,此时材料中无损伤发生。结合声发射信号特征,以声发射信号能量20 mV·ms为分界,首次信号能量大于20 mV·ms的

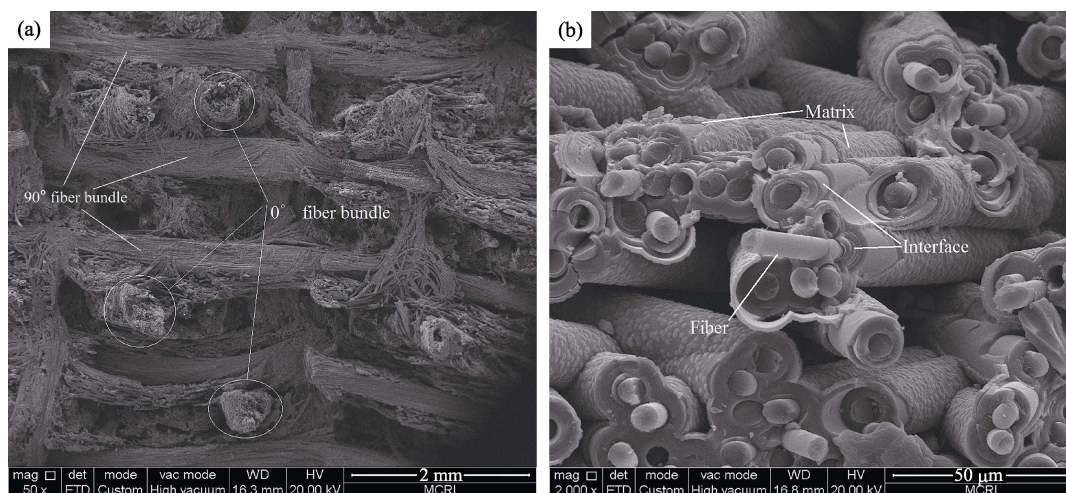


图 9 3D-N C/SiC 试样(a)拉伸断口显微照片和(b)拉伸断口的微观形貌

Fig. 9 Micrograph (50×) of fractured surface and (b) micrograph (2000×) of fractured surface of 3N-C/SiC composite material after tensile stress

应力水平为损伤起始载荷。当裂纹继续扩展到短纤维胎网层和 0°层时, 由于 90°层的失效, 材料应力重新分配, 在短纤维胎网层和 0°层中生成基体裂纹。由于纤维的增韧作用使得基体裂纹需跨越纤维和纤维束合并, 形成纤维桥联, 该过程释放出较大的能量(40~80 mV·ms), 应力-应变曲线非线性显著,

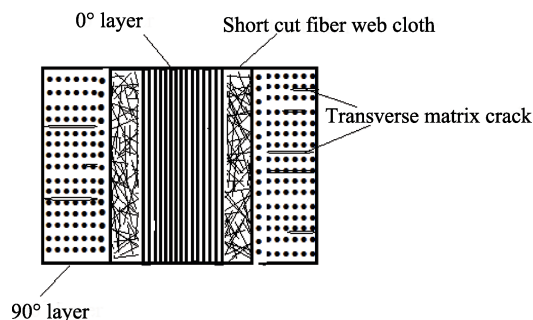


图 10 横向基体裂纹扩展

Fig. 10 Schematic diagram of transverse propagation of transverse matrix crack

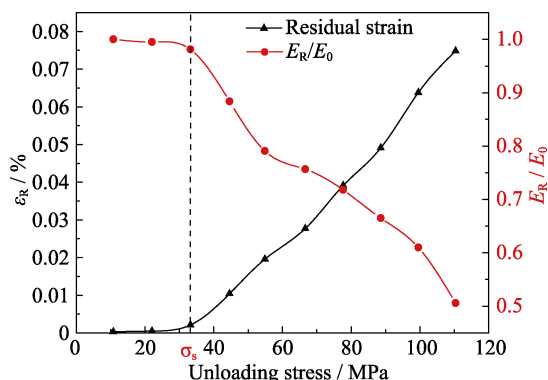


图 11 卸载模量和残余应变随卸载应力的变化

Fig. 11 E_R/E_0 and residual strain vs. stress

E_R : Unloading modulus; E_0 : Elastic modulus; ϵ_R : Residual strain; σ_R : Unloading stress

因此, Cluster 1 对应于基体开裂损伤模式。

对图 8(a)中 II 区 B 点的信号波做频谱分析, 结果如图 8(c)所示。在 II 区的信号波中存在两个主要频率, 分别约为 240 和 370 kHz, 其中 370 kHz 的损伤信号为主要损伤信号。3D-N C/SiC 复合材料的碳纤维和 SiC 基体之间有一层厚度约为 200 nm 的强度较弱的 PyC 界面。界面破坏时释放的能量较少, 声发射信号的幅值也比较小。图 8(a)显示, 当载荷进入 II 区出现能量较低的 Cluster 5 损伤信号。分析认为: 随着载荷的增加, 基体裂纹继续连接、扩展, 累积合并形成大的裂纹。但是由于碳纤维和碳纤维束阻止了裂纹横向扩展, 根据能量最低原理, 裂纹首先沿着 PyC 界面扩展, 从而引起界面脱粘损伤, 因此, Cluster 1 和 Cluster 5 分别对应基体损伤和界面脱粘两类损伤。

图 8(a)中 III 区显示, 在该阶段出现了能量值非常低的 Cluster 4 损伤信号, 对 C 点信号波做频谱分析, 结果如图 8(d)所示, 存在两个主要频率的损伤信号。与 B 点频谱特征比较发现, 240 kHz 损伤信号的频谱幅值明显增大。由此推测, 当发生界面脱粘后, 随着载荷继续增大, 纤维与基体变形不匹配, 纤维表面与基体表面发生相对滑移, 界面上的小突起阻碍基体与纤维之间的相对滑移, 释放的能量也非常少, 声发射信号幅值也很小^[24]。图 9(b)所示, 拔出纤维表面出现壳状物, 且纤维表面存在许多凸起。因此, Cluster 4 损伤信号对应于界面滑移损伤。从裂纹扩展模式(图12)可见, 0°层与单向纤维增强陶瓷基复合材料裂纹扩展模式相同: 基体裂纹的扩展是 I 型裂纹和 II 型裂纹的叠加。

在裂纹尖端, 由于结构的不连续, 存在应力集

中,当纤维应力大于其破坏应力时,纤维断裂。纤维和纤维束的强度分散性较大,纤维随载荷的增加不断发生断裂,在断裂的过程中还可能伴随纤维拔出等失效模式。随着纤维断裂数量的增多,纤维的承载能力逐渐降低,直至失效。纤维之间相互粘结,每次纤维断裂造成的缺陷尺寸较大,使得纤维断裂的声发射信号具有较高的幅值,且具有较高的频率特征^[25]。Gutkin 等^[26]研究碳纤维增强树脂基复合材料的损伤声发射信号,发现纤维损伤的频率范围为 400~600 kHz。图 8(a)显示,当载荷约为 89 MPa 时,出现了能量较大的 Cluster 3 类型的声发射信号,对图 8(a)中 D 点声发射信号波进行频谱特征分析,结果如图 8(e)所示:此阶段信号波中存在三种频率的声发射信号,频率分别为 240、370 和 455 kHz,分别对应界面损伤(界面脱粘和界面滑移)、基体裂纹扩展和纤维断裂三种损伤。纤维断裂时应力重新分配,当应力达到材料的剩余承载极限,裂纹快速扩展,纤维束整体断裂,单次释放极高的能量,Cluster 2 表征的声发射信号具有此特征。从图 9(b)中可以看出:试样断口出现单根纤维拔出和整束纤维的拔出与断裂。图 8(f)显示的是材料断裂失效时 E 点信号波的频谱特征,此时信号中包含多种频率的损伤,其中 594 kHz 的损伤信号幅度最大,对应于纤维束断裂

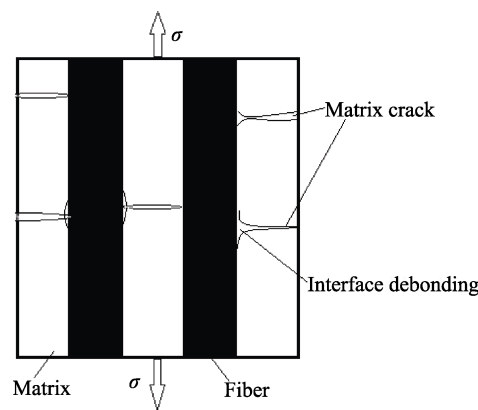


图 12 0°层基体裂纹
Fig. 12 Schematic diagram of matrix crack in 0° layer

损伤。

表 3 中将各类损伤按照载荷增大依次出现的次序进行了归纳,总结了 3D-N C/SiC 复合材料室温拉伸载荷下声发射信号聚类分析和频谱分析结果,得到了材料的损伤模式以及对应的声发射信号特征,为 3D-N C/SiC 复合材料的损伤检测/监测提供了依据。

采用陶瓷基复合材料应力-应变曲线离散化方法,将其应力-应变曲线离散为主要细观失效模式控制区域,材料在每一阶段的失效过程实际是占主导地位细观损伤的累积和破坏。从细观角度看,3D-N C/SiC 复合材料的失效过程可认为是由 90°层基体裂纹、0°层基体裂纹、界面损伤、纤维断裂和纤维束断裂五种失效模式的损伤演化组合而成;从宏观角度看,3D-N C/SiC 复合材料的失效过程与正交层复合材料相似:由降低性能的 0°层单向纤维增强陶瓷基复合材料的失效过程和增韧 90°单向纤维增强陶瓷基复合材料的失效过程组合而成。如果能够建立 0°层和 90°层单向纤维增强陶瓷基复合材料与 3D-N C/SiC 复合材料之间的力学关系,即可用单向纤维增强陶瓷基复合材料的失效参数直接模拟 3D-N C/SiC 复合材料的应力-应变响应。

3 结论

1) 用 K-聚类分析方法能够有效地识别试样的损伤模式。分析结果表明:3D-N C/SiC 复合材料拉伸损伤模式主要有五种:基体开裂、界面脱粘、界面滑移、纤维断裂和纤维束断裂。由于 Z 向纤维的层间增强作用,试样中未出现分层破坏。

2) 基于频谱分析方法对 3D-N C/SiC 复合材料声发射信号进行处理,结果表明该材料在损伤阶段主要存在三种频率的损伤,频率分别为 240、370 和 455 kHz,分别对应界面脱粘和滑移、基体开裂以及纤维断裂,并在临近宏观断裂时出现高频声发射信号(594 kHz),对应纤维束断裂。

表 3 损伤模式的声发射参数特征及演化过程描述

Table 3 Characterization of acoustic emission signals and description of the damage modes

Damage modes	Cluster	Energy/(mV·ms)	Frequency/kHz	Description
Matrix cracking	1	20–80	370	When the load exceeds the proportional limit (37 MPa), crack begins to form and spreads until the sample fails.
Interface debonding	5	10–40	240	When crack extends to the fiber, it deflects and expands along the interface.
Interfacial slipping	4	0–20		
Fiber breakage	3	40–80	455	As cracks become saturated, the fibers begin to break.
Fiber cluster failure	2	70–260	594	That cracks in the material expand rapidly to form macro-cracks attributes to fiber bundle breakage.

参考文献:

- [1] CHEN XIAO-MING, CHEN LI, ZHANG CHUN-YAN, *et al.* Three-dimensional needle-punching for composites – a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, **85**: 12–30.
- [2] KADIR BILISIK. Three-dimensional braiding for composites: a review. *Textile Research Journal*, 2012, **83**(13): 1414–1436.
- [3] NIE JING-JIANG, XU YONG-DONG, ZHANG LI-TONG, *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.
- [4] CHEN ZHEN, FANG GUO-DONG, XIE JUN-BO, *et al.* Experimental study of high-temperature tensile mechanical properties of 3D needled C/C–SiC composites. *Materials Science & Engineering A*, 2016, **654**(10): 271–277.
- [5] XU HUA-JIE, ZHANG LI-TONG, CHENG LAI-FEI. The yarn size dependence of tensile and in-plane shear properties of three-dimensional needled textile reinforced ceramic matrix composites. *Materials & Design*, 2015, **67**: 428–435.
- [6] XIE JUN-BO, FANG GUO-DONG, CHEN ZHEN, *et al.* An anisotropic elastoplastic damage constitutive model for 3D needled C/C–SiC composites. *Composite Structures*, 2017, **176**: 164–177.
- [7] 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.
- [8] MEI HUI, SUN YU-YAO, ZHANG LI-TONG, *et al.* Acoustic emission characterization of fracture toughness for fiber reinforced ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **560**: 372–376.
- [9] 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.
- [10] CHANG YAN-JUN, JIAO GUI-QIONG, ZHANG KE-SHI, *et al.* Investigation on tensile properties for 3D C/SiC composites by acoustic emission. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2010, **27**(6): 82–87.
- [11] 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): 254–260.
- [12] TONG XIAO-YAN, ZHANG JIA-LI, YAO LEI-JIANG, *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.
- [13] YAN LIAN-SHENG, CUI HONG, LI KE-ZHI, *et al.* Preparation and properties of carbon fiber needling preform reinforced silicon carbide composite. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, **23**(2): 223–228.
- [14] JEONG H. Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform. *NDT & E International*, 2001, **34**(3): 185–190.
- [15] MORIZET N, GODIN N, TAMG J, *et al.* Classification of acoustic emission signals using wavelets and random forests: application to localized corrosion. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, **70–71**: 1026–1037.
- [16] SAIDANE E H, SCIDA D, ASSARAR M, *et al.* Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fiber composites using acoustic emission. *Composite Structures*, 2017, **174**(Supplement C): 1–11.
- [17] MORSCHER G, SINGH M, KISER J, *et al.* Modeling stress-dependent matrix cracking and stress-strain behavior in 2D woven SiC fiber reinforced CVI SiC composites. *Composites Science and Technology*, 2007, **67**(6): 1009–1017.
- [18] BREEDE F, KOCH D, MAILLET E, *et al.* Modal acoustic emission of damage accumulation in C/C–SiC composites with different fiber architectures. *Ceramic International*, 2015, **41**(9, Part B): 12087–12098.
- [19] LI PAN, WANG BO, ZHEN WEN-QIANG. Tensile constitutive model of 2D-SiC/SiC ceramic matrix composites. *China Ceramic Industry*, 2013, **20**(5): 10–14.
- [20] LI LI, LOMOV S V, YAN X, *et al.* Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2014, **116**(1): 286–299.
- [21] ECH-CHOUDARY 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.
- [22] XU YONG-DONG, CHENG LAI-FEI, ZHANG LI-TONG. Carbon/silicon carbide composites prepared by chemical vapor infiltration combined with silicon melt infiltration. *Carbon*, 1999, **37**(8): 1179–1187.
- [23] SINGH Y P, MANSOUR R, MORSCHER G N. Combined acoustic emission and multiple lead potential drop measurements in detailed examination of crack initiation and growth during inter-laminar testing of ceramic matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, **97**: 93–99.
- [24] SUN ZHI-GANG, SHAO HONG-YAN, NIU XU-MING, *et al.* Failure simulation of unidirectional fiber-reinforced ceramic matrix composites based on evolving compliant interfacial debonding model. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **663**: 78–85.
- [25] MORSCHER G N, GORDON N A. Acoustic emission and electrical resistance in SiC-based laminate ceramic composites tested under tensile loading. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, **37**(13): 3861–3872.
- [26] GUTKIN R, GREEN C J, VANGRATTANACHAI S, *et al.* On acoustic emission for failure investigation in CFRP: pattern recognition and peak frequency analyses. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2011, **25**(4): 1393–1407.