

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.0021

# 三维编织复合材料拉伸损伤声发射监测与显微CT表征

邢广怀<sup>1</sup>, 商雅静<sup>2</sup>, 邢浩<sup>1</sup>, 刘佳<sup>3</sup>, 周伟<sup>3</sup>

(1. 河北省特种设备监督检验研究院衡水分院, 河北衡水 053000; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

3. 河北大学质量技术监督学院, 河北保定 071002)

**摘要:** 为了准确评估碳纤维三维编织复合材料力学行为及损伤特性, 利用声发射技术对复合材料的拉伸损伤过程展开实时监测, 并基于概率熵统计分析方法研究材料损伤演化所产生声发射信号的动态响应行为。此外, 采用显微CT扫描技术对复合材料的内部损伤状态进行可视化表征。结果表明, 声发射信号的特征能够很好地反映复合材料的破坏过程, 声发射信号概率熵的演变描述了复合材料内部不可逆的损伤与失效机制。声发射结合显微CT技术能够有效地获取三维编织复合材料内部不同截面上的微观结构及其损伤特征, 为该类复合材料的无损检测与寿命评估提供技术支持。

**关键词:** 三维编织复合材料; 拉伸损伤; 声发射; 概率熵; 显微断层扫描

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0108-06

## Acoustic Emission Monitoring and Micro-CT Characterization of Tensile Damage for Three Dimensional Braided Composites

Xing Guanghuai<sup>1</sup>, Shang Yajing<sup>2</sup>, Xing Hao<sup>1</sup>, Liu Jia<sup>3</sup>, Zhou Wei<sup>3</sup>

(1. Hebei Province Special Equipment Supervision and Inspection Institute Hengshui Branch, Hengshui 053000, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract :** In order to accurately evaluate the mechanical behavior and damage characteristics of carbon fiber three dimensional braided composites, acoustic emission (AE) technology was used to monitor the tensile damage process of composites in real time, and the dynamic response behavior of acoustic emission signals generated by damage evolution of such material was studied based on statistical analysis of probabilistic entropy. In addition, the internal damage condition of the composites was visualized through micro-computed tomography scanning. The results show that the AE signals can reflect the destruction process of composites, and the irreversible internal damage and failure mechanism of the composites are well described through the evolution of probability entropy of AE signals. The microstructures and damage characteristics of different sections inside the three dimensional braided composites can be obtained effectively by the combination of AE and micro-CT technologies, which provides technical supports for the nondestructive detection and life evaluation of this kind of composites.

**Keywords :** three dimensional braided composites ; tensile damage ; acoustic emission ; probability entropy ; micro-computed tomography

碳纤维三维编织复合材料的制备通过增加厚度方向的编织纱线形成空间网状结构, 其抗分层和抗剪切能力得到明显提高, 广泛应用于航空航天、汽车和能源等诸多领域<sup>[1]</sup>。三维编织复合材料复杂的

内部结构使其在应用场合中承受载荷时的破坏失效行为还缺乏深入的认识。因此, 研究不同载荷下的损伤失效机制有助于推动三维编织复合材料的工程应用。

**基金项目:** 河北大学高层次人才科研启动项目 (521000981417)

**通信作者:** 刘佳, 博士, 主要从事复合材料声学及光学无损检测技术研究 E-mail: liujia@hbu.edu.cn

**收稿日期:** 2021-03-02

**引用格式:** 邢广怀, 商雅静, 邢浩, 等. 三维编织复合材料拉伸损伤声发射监测与显微CT表征 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 108-113.

Xing Guanghuai, Shang Yajing, Xing Hao, et al. Acoustic emission monitoring and micro-CT characterization of tensile damage for three dimensional braided composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 108-113.

研究人员已经围绕三维编织复合材料的力学性能展开较多的相关工作。A. E. Bogdanovich 等<sup>[2]</sup>开展拉伸试验探究三维编织复合材料的力学性能,发现预制体中纤维的波纹和非卷曲结构使复合材料的刚度和强度得到明显提升。张迪等<sup>[3]</sup>发现编织方式和编织角均对三维多向编织复合材料试件的拉伸与压缩损伤破坏产生重要影响。然而,三维编织复合材料的宏观力学性能难以直接反映其内部损伤与破坏机制。

声发射(AE)检测是对物体内部应变能释放所产生的AE信号进行动态监测无损检测技术<sup>[4]</sup>。S. V. Lomov 等<sup>[5]</sup>指出在拉伸破坏试验中AE信号的特征可以揭示三维编织复合材料的损伤演化规律。苏华等<sup>[6]</sup>通过AE检测实验研究发现,三维编织复合材料中预制缺陷处的声发射信号能量有所提升,并且缺陷的类型影响AE信号能量释放率。

然而,仅对AE特征参数进行描述的方法仍然无法完全揭示复合材料的损伤模式及失效机制,需要利用统计学分析方法深入挖掘AE信号所蕴含的潜在规律。A. Khonsari 等<sup>[7]</sup>展开弯曲疲劳试验研究环氧树脂/玻璃纤维复合材料和铝合金的AE响应规律,通过计算和分析AE信号的声学熵,发现两种材料的最大累积声学熵具有一致的变化规律。周伟等<sup>[8]</sup>对比了三维四向和五向编织复合材料拉伸损伤AE信号的概率熵,提出概率熵能够反映不同编织方式试件损伤规律的差异。

显微CT扫描技术能对材料内部结构的变形损伤进行三维成像、可视化表征<sup>[9]</sup>。Zhou Wei 等<sup>[10]</sup>组合使用AE与显微CT技术研究了三维编织复合材料在渐进拉伸作用下的破坏过程,发现两者的互补验证能够揭示内部损伤的演变规律。Zhang Yannan 等<sup>[11]</sup>研究了碳纤维增强复合材料在压痕-压缩实验中的破坏失效,提出AE检测辅以显微CT分析有助于全面掌握试件损伤的发生发展过程。因此,AE和显微CT技术的组合是研究碳纤维三维编织复合材料失效破坏的有效手段。

笔者采用AE技术实时监测拉伸试验中碳纤维三维编织复合材料的破坏过程,通过计算概率熵分析复合材料损伤演化的AE动态响应规律,借助显微CT扫描对复合材料内部损伤进行可视化表征。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

碳纤维:T700-12K型,日本东丽株式会社;

环氧树脂:TDE-86型,天津晶东化学复合材料有限公司。

### 1.2 仪器和设备

力学试验机:LD26型,深圳兰博三思材料检测有限公司;

全波形AE仪:DS2-8A型,北京软岛时代科技有限公司;

AE传感器:RS-54A型,北京软岛时代科技有限公司;

X射线显微CT扫描仪:Skyscan 1172型,比利时Sky Scan公司。

### 1.3 试样制备

编织碳纤维获得平均编织角约 $30^\circ$ 的预制体,采用回流辅助加热技术真空灌注树脂并固化,得到厚度为 $(2.3 \pm 0.1)$  mm、纤维体积分数为55%的三维四向编织复合材料。

参照ASTM D638-2014标准,结合显微CT对样品尺寸的限制,将三维编织复合材料沿编织方向进行机械加工,制备尺寸为 $60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的小型拉伸试件。为了便于夹持及避免端部损伤,在两端粘贴 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的铝加强片。拉伸试件的几何结构及尺寸如图1所示。

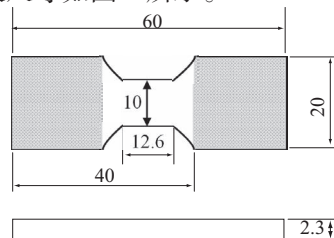


图1 三维编织复合材料试件结构及尺寸

### 1.4 性能测试

通过力学试验机以 $2\text{ mm/min}$ 的速率对碳纤维三维四向编织复合材料试件进行轴向拉伸测试,监测加载过程中的AE信号,试验测试系统如图2所示。试验所采用的AE传感器覆盖 $100 \sim 900\text{ kHz}$ 的宽频带范围,其前置放大器的增益为 $40\text{ dB}$ 。将AE传感器固定在试件上,为了消除噪声干扰,基于预实验选择信号采样频率为 $3\text{ MHz}$ ,并且采集 $10\text{ mV}$  ( $40\text{ dB}$ ) 以上的信号。

拉伸加载后,通过X射线显微CT扫描仪获取试件的内部变形和损伤状态,分辨率设为 $9\text{ }\mu\text{m}$ ,测试示意图如图3所示。将复合材料试样垂直固定在样品台上,以 $0.2^\circ$ 的步长逆时针旋转,X射线逐层扫描试样内部结构,扫描图像可由CCD相机同步

记录。扫描结束后,基于扫描图像重构得到试样的三维模型。

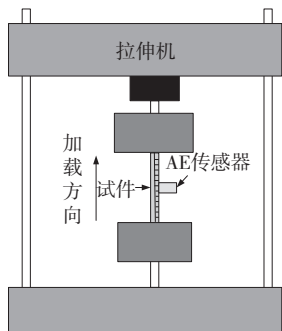


图2 三维编织复合材料拉伸试验系统

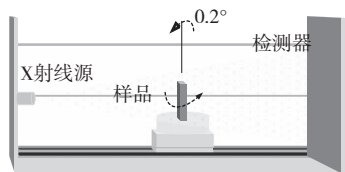


图3 显微CT测试示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 力学行为及AE特性分析

图4为拉伸载荷以及AE相对能量的时间历程。当时间在0~10 s时,拉伸载荷变化较小且没有AE信号产生。拉伸载荷逐渐增大时监测到少量能量较低的信号,试件开始产生轻微的损伤。随着加载的逐步推进,载荷随时间线性增加,AE信号能量也持续增大,试件的损伤不断加剧。时间推移至115 s左右,所监测到AE信号的能量出现阶跃式提升,材料内部产生明显损伤。AE信号的相对能量随着载荷继续增加而持续增加,数量也呈现出显著的增长趋势。当拉伸载荷达到12 kN时,试件发出较大爆鸣声,推测复合材料产生了剧烈的内部损伤。当时间到达180 s时,加载达到峰值载荷12.89 kN,试件断裂,所引起的AE信号具有12000 mV·ms的极值能量。此后,载荷急剧下降直至试件被完全破坏。

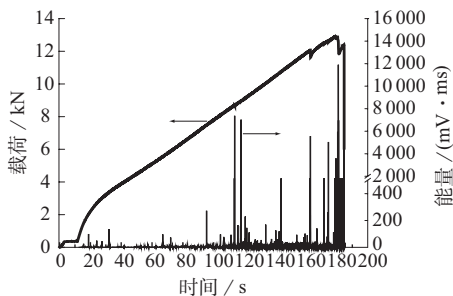


图4 载荷与相对能量随时间的变化

图5示出试件的AE信号幅值与撞击累积数的时间变化历程。对于早期损伤阶段,绝大多数AE

信号的幅值较低。由于外界噪声干扰,监测到少量的高幅值信号。早期损伤阶段AE信号的撞击累积数较低并且增长趋势较为缓慢,试件的损伤源于小范围基体开裂和制备过程中的工艺缺陷所引发的微损伤<sup>[12]</sup>。持续加载推动试件进入损伤累积阶段,AE信号数量不断增加,且AE信号的幅值以及撞击累积数也逐步增大。在此阶段信号幅值主要集中在40~80 dB之间。115 s时具有80~100 dB高幅值的AE信号数量显著增加,撞击累积数明显增加并且其增长速率显著加快。这一突出变化与图4中AE信号相对能量的变化趋势相吻合,此阶段试件以基体开裂以及纤维/基体界面脱粘为主要损伤模式,部分碳纤维产生轻微损伤<sup>[13]</sup>。在复合材料失效阶段,40~80 dB和80~100 dB两个幅值范围的AE信号数量都呈现出迅速增多的趋势,AE信号的撞击累积数曲线急剧上升。结合图4可以看出,加载至162 s,AE信号幅值接近最大值,撞击累积数曲线的增长速率达到最大并且相应的产生较大能量。当时间推移至180 s左右,拉伸载荷达到峰值,AE累积撞击数同样达到整个试验过程的峰值,并且伴随有数量较多的高幅值AE信号。这一时期,同时出现基体开裂、纤维断裂以及纤维/基体脱粘等损伤类型。

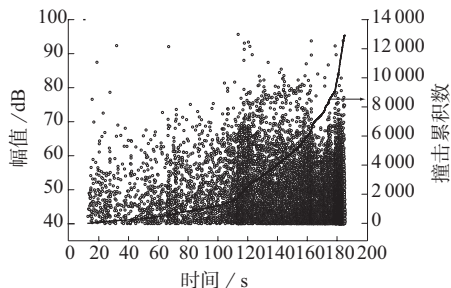


图5 幅值与撞击累积数随时间的变化

### 2.2 AE信号概率熵分析

为了进一步评估三维编织复合材料在拉伸过程中的损伤演化特征,采用统计分析方法对不同载荷水平下AE信号的概率熵进行计算。由于所监测到AE信号的幅值集中分布在40~100 dB范围内,笔者将幅值划分为60个子区间以提高概率熵计算精度。以1 kN为间隔对概率熵计算结果进行提取,总共得到13个不同载荷下的概率熵数值。不同载荷水平所对应试件概率熵的变化趋势如图6所示。根据概率熵-载荷曲线可以将试件的损伤划分成三个演化阶段:

(1) 早期损伤阶段(A至B):当拉伸载荷处于1

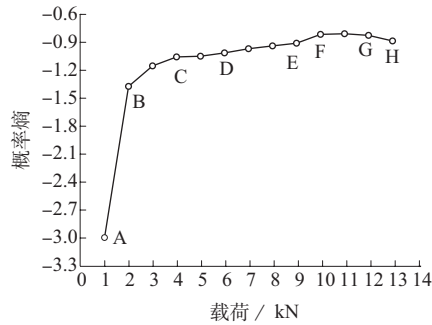


图6 不同载荷水平下 AE 信号概率熵的变化

kN (A 点) 时, 概率熵 ( $S$ ) 的数值最小,  $S = -2.996$ , 此时损伤状态的确定性最高。随着拉伸载荷增加至 2 kN, 熵值近似线性增加, 说明加载初期的损伤程度不明显。具有低幅值的 AE 事件陆续出现, 低载荷水平下试件的内部和表面出现基体开裂等局部微小损伤。

(2) 损伤累积阶段 (B 至 E): 当载荷从 2 kN 增加到 4 kN (B 至 C), 概率熵的值增加, 但变化曲线经 B 点后由直线变为上凸形, 概率熵的增加速度逐步减缓。BC 加载阶段的载荷增加导致出现更多的基体开裂, 并且纤维与基体的脱粘作为新的损伤模式在试件中出现, 然而损伤状态的不确定性相较于早期损伤阶段轻微下降。随着载荷水平的持续增加 (C 至 D), 概率熵达到一个相对稳定的数值, 不同尺度损伤数量仍然大幅增加, 但损伤状态无明显的改变<sup>[8]</sup>。CD 加载阶段, 没有产生与上述两种损伤不同的新型损伤模式, 材料的立体编织结构对拉伸载荷的响应保持相对稳定。当载荷从 6 kN 增加至 9 kN (D 至 E), 概率熵值再一次随载荷呈近似线性增加, 但是增长速率远小于 AB 阶段。此过程的 AE 信号数量不断增多, 且在 E 点附近产生了少量具有高幅值高相对能量的 AE 信号, 如图 4 和图 5 所示 (时间对应关系)。试件在拉伸载荷作用下随机生成的微损伤事件所激发的声发射信号覆盖所有的幅值区间。

(3) 失效阶段 (E 至 H): 当载荷从 9 kN 增加至 10 kN (E 至 F) 时, 概率熵值及其变化速率相较于前一阶段出现较为明显的增加, 随机微损伤事件的急剧增多导致损伤状态的不确定性增加, 本阶段试件内部同时出现多种损伤的萌生与演化。随着载荷水平逐渐接近失效值 (F 至 G), 概率熵值也上升至整个加载过程的最大值并且保持相对稳定, 随机生成微损伤事件的数量及其在复合材料内部的空间分布没有出现明显变化, 试件损伤状态的发展趋于稳

定。当载荷达到峰值时 (G 至 H), 概率熵值略有减小, 损伤状态的确定性增加, 试件最终失效破坏。

以上分析表明, 将概率熵引入到 AE 信号的统计分析中可以有效阐明三维编织复合材料内部随机生成的微观损伤模式以及损伤状态演化机制。

### 2.3 显微 CT 表征结果分析

采用 X 射线显微 CT 扫描时首先将失效试件垂直轴线方向切割得到尺寸为 15 mm × 10 mm 并且含有损伤破坏区域的 CT 扫描试样, 然后逐层扫描得到二维切面图像, 进而通过模型重建技术得到能够清晰复现试件内部真实微观结构的三维模型。图 7 展示了三维编织复合材料 CT 扫描试样的立体模型。分别沿三维模型的正面、侧面和切面方向进行分割, 提取与试件表面距离 25%, 50% 和 75% 的截面图像, 以便于充分分析拉伸载荷所带来的三维四向编织复合材料的微观结构损伤。

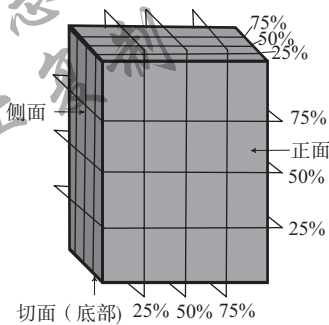
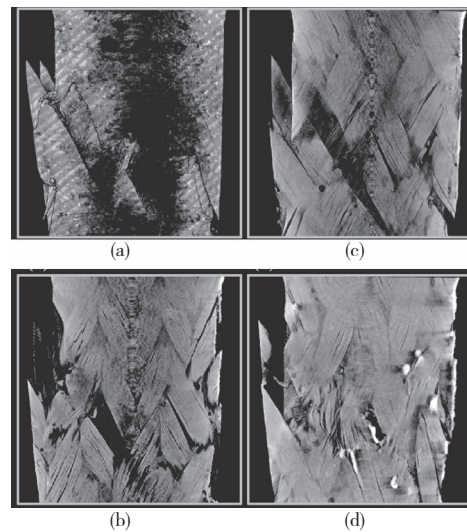


图7 三维重建模型和沿不同方向切割示意图

CT 扫描试样沿正面切割的截面图像如图 8 所示。



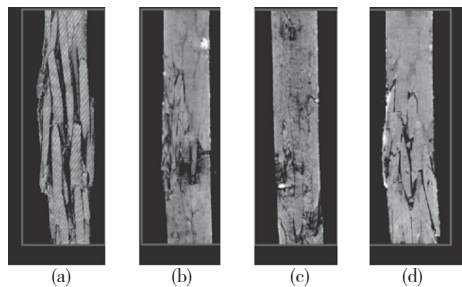
距离表面位置: a—0%; b—25%; c—50%; d—75%

图8 试样沿正面进行切割的截面图像

试样表面分布有锯齿状断口, 且在断口处能观

观察到典型的三种损伤模式:基体开裂、纤维断裂和纤维/基体脱粘,如图 8a 所示。由于笔者使用具有一定形态及尺寸的拉伸试件,制备时需要进行切割加工,因此会给试件带来一定初始损伤,如纤维损伤和微裂纹等。在拉伸加载过程中,初始损伤进一步发展演化,显著加剧了损伤状态,在扫描试样的两侧均观察到了纤维断裂与拔出。与距表面 50% 处(图 8c)的截面相比,可以明显观察到距试样表面 25% (图 8b) 和 75% (图 8d) 处的截面上分布有数量更多的微观结构损伤。

CT 扫描试样沿侧面进行切割的截面图像如图 9 所示。试样侧表面分布有大量的基体开裂和纤维断裂与拔出等典型复合材料损伤,如图 9a 所示。通过与图 8a 对比研究可以看出,试样侧面具有比正面更为严重的损伤状态。原因在于尺寸的不同导致侧面和正面的碳纤维数量存在差异,侧面承受力学加载的能力比正面弱。与沿正面切割的截面对比结果类似,试件距离侧表面 25% 和 75% 处的截面损伤相比于距离侧表面 50% 处截面的损伤更为显著。综合分析正面和侧面方向截面图像的损伤形貌可以推断,拉伸测试开始后裂纹首先在材料的表面萌生并延伸,随后裂纹逐渐扩展至表面附近的碳纤维纱线,引起纱线断裂失效并释放能量。表层纱线失效后,其附近基体对力学加载的承受能力降低,持续增加的拉伸载荷作用在试件内部保持完好的碳纤维纱线以及环氧树脂基体上。当载荷增加到一定程度时,试件整体失效发生断裂破坏。

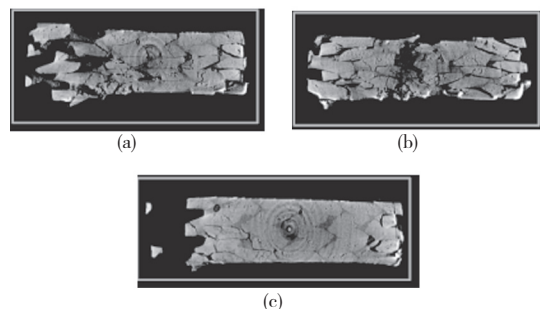


距离表面位置: a—0%; b—25%; c—50%; d—75%

图 9 试样沿侧面进行切割的截面图像

CT 扫描试样沿切面进行切割的截面图像如图 10 所示。观察发现,很多裂纹分布在与载荷施加方向相垂直的截面上,基体开裂、纤维断裂与拔出、纤维/基体脱粘等损伤类型同时出现在试件边缘。与正面和侧面方向不同的是,距离试样表面 25% 和 50% 处截面所观察到的损伤比 75% 处截面的损伤

更为剧烈。综合分析复合材料沿各方向的截面图发现试样断口呈现为锯齿状。这是由于三维编织复合材料试件的断口位置同时承受了拉伸和剪切两种载荷的叠加作用,因而经历了比试件其它部位更加显著的损伤演化过程。



距离表面位置: a—25%; b—50%; c—75%

图 10 试样沿切面方向切割的截面图像

综合上述显微 CT 表征结果分析,可以发现显微 CT 作为新兴的无损检测技术能够直观得到碳纤维编织复合材料不同方向任意截面内的微观形态特征以及结构损伤信息,可以提高对编织复合材料损伤演化规律的认识。

### 3 结论

采用 AE 无损检测技术实时监测碳纤维三维四向编织复合材料的轴向拉伸过程,对三维复合材料损伤演化所产生的 AE 信号及其概率熵进行了分析。此外,利用显微 CT 技术对失效后的复合材料进行扫描,重构试件三维模型并分析了试件内部的微观结构损伤情况。结论如下:

(1) 拉伸过程中三维四向编织复合材料在多种损伤模式的影响下最终断裂失效,所监测到的 AE 信号的相对能量、幅值和撞击累积数等典型参数很好地反映了复合材料的损伤演化机制。

(2) 基于 AE 信号概率熵的分析方法能够识别并揭示复合材料内部随机生成微观损伤事件的类型以及损伤状态演化的物理机制,熵值的变化反映损伤状态的发展趋势。

(3) 显微 CT 技术能够获取复合材料内部不同截面上的微观结构信息及损伤特征。三维四向复合材料在拉伸和剪切两种载荷的叠加作用下最终形成了呈倾斜锯齿状的断口。材料的损伤由表层向内部逐渐扩展,断口处同时存在基体开裂、纤维断裂和纤维/基体脱粘等典型损伤。

### 参考文献

- [1] Sun Jin, Wang Yu, Zhou Guangmin, et al. Finite element analysis

- of mechanical properties of 3D surface-core braided composites[J]. Polymer Composites, 2018, 39(4):1 076-1 088.
- [2] Bogdanovich A E, Karahan M, Lomov S V, et al. Quasi-static tensile behavior and damage of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric[J]. Mechanics of Materials, 2013, 62:14-31.
- [3] 张迪,郑锡涛,孙颖,等. 三维编织与层合复合材料力学性能对比试验[J]. 航空材料学报, 2015, 35(3):89-96.  
Zhang Di, Zheng Xitao, Sun Ying, et al. Comparative investigation of mechanical properties between 3D braided and laminated composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(3):89-96.
- [4] 严实,赵金阳,陆夏美,等. 基于声发射技术的三维编织复合材料低速冲击损伤分析[J]. 材料工程, 2014(7):92-97.  
Yan Shi, Zhao Jinyang, Lu Xiamei, et al. Low-velocity impact response of 3d braided composites by acoustic emission[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(7):92-97.
- [5] Lomov S V, Karahan M, Bogdanovich A E, et al. Monitoring of acoustic emission damage during tensile loading of 3D woven carbon/epoxy composites[J]. Textile Research Journal, 2014, 84(13):1 373-1 384.
- [6] Su Hua, Zhang Tianyuan, Zhang Ning. Acoustic emission based defects monitoring of three-dimensional braided composites using wavelet network[J]. International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems, 2016, 9(2):780-798.
- [7] Kahirdeh Ali, Khonsari M M. Acoustic entropy of the materials in the course of degradation[J]. Entropy, 2016.doi.org/10.3390/entropy18080280.
- [8] Zhou Wei, Shang Yajing, Zhang Pengfei, et al. Statistical analysis of acoustic emission signals and tensile deformation measurement for three dimensional carbon fiber braided composites[J]. SN Applied Sciences, 2020.doi:10.1007/s42452-020-3069-5.
- [9] Reddy K N, Gangadharan R, Ramji M. Experimental and numerical studies on the buckling and post-buckling behavior of single blade-stiffened CFRP panels[J]. Composite Structures, 2018, 196:135-154.
- [10] Zhou Wei, Qin Reng, Han Kangning, et al. Progressive damage visualization and tensile failure analysis of three-dimensional braided composites by acoustic emission and micro-CT[J]. Polymer Testing, 2021.doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106881.
- [11] Zhang Yannan, Zhou Wei, Zhang Pengfei. Quasi-static indentation damage and residual compressive failure analysis of carbon fiber composites using acoustic emission and micro-computed tomography[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(2):229-242.
- [12] Zhou Wei, Lyu Zhihui, Wang Yarui, et al. Acoustic response and micro-damage mechanism of fiber composite materials under mode-II delamination[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(4):77-80.
- [13] Li Suhong, Liu Lifang, Yan Jianhua, et al. An approach for testing and predicting longitudinal tensile modulus of 3D braided composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(8):775-784.

## 欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。《化学分析计量》为月刊, 大 16 开本, 每月 20 日出版, 2021 年定价 20 元/期, 全年 240 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355