

基于声发射技术的 T700 碳纤维/ 树脂基体界面性能评估

刘家鑫¹, 李秉洋¹, 钟勇², 肖云健³, 赵维刚¹, 王鹏飞¹

(1.中国航天科技创新研究院, 北京 100163; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039;
3.北京天宜上佳高新材料股份有限公司, 北京 102402)

摘要: **目的** 采用声发射技术, 对东丽 T700 碳纤维和 2 款树脂基体的界面性能进行评估。**方法** 通过多组单丝拉伸试验, 获取 T700 碳纤维 Weibull 形状参数 m 和尺度参数 σ_0 。使用单纤维断裂方法, 利用声发射技术进行监测, 选择声发射信号的幅值和能量作为特征, 对 T700 碳纤维和透明的 E51 环氧树脂及不透明的聚苯硫醚树脂的单纤维断点数量分别进行评估, 并与显微镜观察的数量进行对比。**结果** 获取了 T700 碳纤维与 2 种树脂的单纤维断裂声发射信号特征数值。通过声发射监测和显微镜观察法, 测量得 T700 碳纤维与 E51 环氧树脂的界面剪切强度分别为 44.03、46.47 MPa, 偏差在 5.5% 左右。通过声发射技术, 测量得 T700 碳纤维与聚苯硫醚树脂的界面剪切强度达 33.43 MPa。**结论** 使用声发射技术能够准确监测碳纤维/树脂界面中单纤维的断裂信号, 为评价纤维和不透明树脂的界面性能提供了有效方法。

关键词: 声发射技术; 界面性能; 单丝拉伸; 单纤维断裂方法; 不透明树脂

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)05-0111-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.016

Evaluation of Interfacial Performance of T700 Carbon Fiber/Resin Matrix by Acoustic Emission

LIU Jia-xin¹, LI Bing-yang¹, ZHONG Yong², XIAO Yun-jian³, ZHAO Wei-gang¹, WANG Peng-fei¹

(1. China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing 100163, China; 2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 3. Beijing Tianyishangjia New Material Corp., Ltd., Beijing 102402, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the interfacial performance of TORAY T700 carbon fiber and two kinds of resin matrices by acoustic emission (AE). The Weibull shape parameter m and scale parameter σ_0 of T700 carbon fiber were obtained through multiple single-filament tests. The number of fragment in T700 carbon fiber, transparent E51 epoxy resin and opaque polyphenylene sulfide resin was evaluated by the single fiber fracture test method with AE signal amplitude and energy as characteristics through AE monitoring and then compared with that observed by microscope. Single fiber fracture AE signal characteristics of T700 carbon fiber and two kinds of resins were obtained. The interfacial shear strength of T700 carbon fiber and E51 epoxy resin obtained by AE monitoring and microscope observation method was 44.03 MPa and 46.47 MPa respectively, with a

收稿日期: 2023-03-14; 修订日期: 2023-05-06

Received: 2023-03-14; Revised: 2023-05-06

作者简介: 刘家鑫 (1990—), 男, 硕士。

Biography: LIU Jia-xin (1990-), Male, Master.

引文格式: 刘家鑫, 李秉洋, 钟勇, 等. 基于声发射技术的 T700 碳纤维/树脂基体界面性能评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 111-118.

LIU Jia-xin, LI Bing-yang, ZHONG Yong, et al. Evaluation of Interfacial Performance of T700 Carbon Fiber/Resin Matrix by Acoustic Emission [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 111-118.

deviation of about 5.5%. The interfacial shear strength of T700 carbon fiber and polyphenylene sulfide resin measured by AE was 33.43 MPa. AE can accurately monitor the fracture signal of single fiber in the carbon fiber/resin interface, which provides an effective method for evaluating the interfacial performance of fiber and opaque resin.

KEY WORDS: acoustic emission; interfacial performance; single-filament; single fiber fracture test; opaque resin

纤维增强树脂基复合材料具有轻质高强的优异性能,在航空航天、海洋船舶等领域得到了越来越广泛的应用^[1-5]。纤维和树脂间的界面剪切强度(Interfacial Shear Strength, IFSS)是决定复合材料界面性能的重要因素,对于其力学性能及耐老化也具有很重要的影响^[6-11]。界面剪切强度过低,材料强度将很差;而如果界面剪切强度过高,在受力时则容易产生应力裂纹扩展^[12]。因此,为了达到试验或工程目的,使用合适方法获得界面剪切强度很有必要。

界面剪切强度可以通过试验进行表征,由 Kelly 和 Tyson 提出的单丝断裂法(Single Fiber Fracture Test, SFFT)^[13]由于制样简单,使用较少数目的试样就能获得界面性能,且能提供大量的信息,而备受关注。目前,使用单丝断裂法测量的主要对象是热固性树脂和纤维的复合体系,要求试样具有透明性,且树脂的断裂伸长率是纤维的3倍以上,以便使用显微镜即时观察纤维的断点数目^[7,14]。

声发射(Acoustic Emission, AE)是材料或者部件受到力的作用产生变形、断裂或内部应力超过屈服极限而进入不可逆的塑性变形阶段以瞬间弹性波形式释放应变能的现象。声发射技术是一种被动无损检测技术,可以接收材料或零件内部的声发射源产生的声波信号。复合材料中的分层、树脂基体产生裂纹、纤维脱粘和纤维断裂等这些损伤模式都是重要的声发射信号来源^[15-16]。

声发射监测的主要过程如图1所示。将传感器粘贴在试样表面,经过动态或静态的变化,试样内部的声发射源产生的声波经前置放大器放大,由声发射检测仪接收分析处理。目前,声发射技术广泛应用于树脂基复合材料层合板的损伤破坏监测。研究发现,特定树脂和特定纤维组成的复合材料树脂开裂、纤维

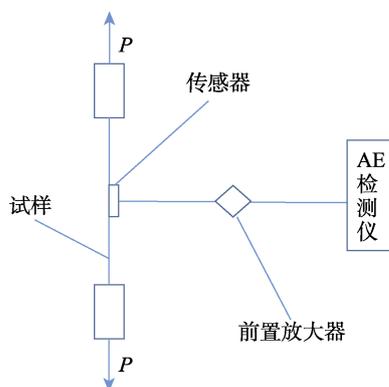


图1 声发射监测

Fig.1 Acoustic emission monitoring

和树脂脱粘及纤维断裂具有固定的声发射信号特征,即具有确定范围的能量、持续时间和幅值等^[17-18]。

通过声发射技术对单丝断裂界面性能的研究相对较少,且主要集中在透明的热固性树脂方面^[19-21],以便与显微镜观察进行对比,但对于不透明的热塑性树脂,却鲜有报道。本文通过对 T700 碳纤维进行单丝拉伸测试和线性拟合,获取其 Weibull 形状参数 m 和尺度参数 σ_0 ,经过与显微镜观察结果进行对比,有效验证了声发射技术通过能量和幅值筛选纤维断裂信号的准确性,并基于此测试了 T700 碳纤维和聚苯硫醚(Polyphenylene Sulfide, PPS)树脂的界面剪切强度,为纤维和不透明树脂的界面性能提供了系统性研究方法。

1 界面剪切强度模型

Kelly 和 Tyson 提出的单丝断裂法是将纤维单丝置于哑铃形模具中央,之后将树脂注入模具,经过固化处理、脱模后,成为单丝包裹在树脂中央的哑铃形试样。在拉伸测试过程中,纤维随着树脂逐渐产生拉伸应变,当应变达到纤维的断裂长度时,纤维发生断裂。随着加载的继续,纤维和树脂的界面会继续传递应力,使纤维继续发生断裂。直至纤维在树脂中达到或低于临界长度时,纤维和树脂的界面不足以传递应力,此时纤维达到饱和断裂,如图2所示。

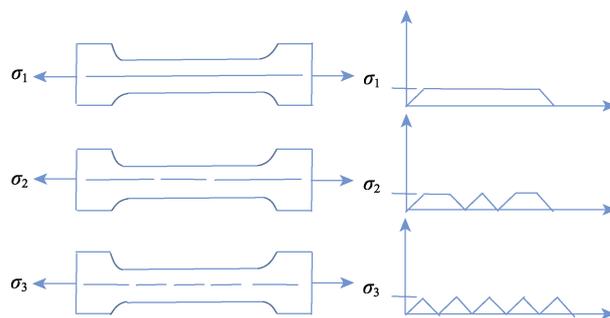


图2 单丝断裂试验

Fig.2 Single-filament fracture test

此时,树脂中的各段纤维长度在 l 和 $l/2$ 之间,根据纤维的平均断裂长度可以计算出纤维和树脂的界面强度。一般认为纤维的平均断裂长度为:

$$l_c = \frac{3}{4}l \quad (1)$$

根据模型,树脂基体的断裂延伸率是纤维的3倍以上, Kelly 和 Tyson 提出界面强度(IFSS) τ 计算

条件:

$$\tau = \frac{\sigma_f d}{2l} \quad (2)$$

式中: σ_f 为纤维在临界断裂长度下的纤维强度;
 d 为纤维直径。

对于存在直接测量 σ_f 很困难的问题, 考虑到一般脆性纤维强度符合 Weibull 分布, 因此 σ_f 可以由 Weibull 分布参数计算得到:

$$\sigma_f = \sigma_0 (l/l_0)^{-\frac{1}{m}} \quad (3)$$

式中: l_0 为单丝拉伸强度中的标准长度; σ_0 为纤维长度为 l_0 下的纤维强度; m 为纤维的 Weibull 形状参数^[22]。

2 试验

2.1 材料

所使用的 T700 纤维为日本东丽公司产品。透明的环氧树脂型号为 E51, 所用固化剂为聚醚胺固化剂 D400, 由蓝星化工新材料股份有限公司提供, 其断裂伸长率大于 15%。所使用的 PPS 树脂为粉末状, 由德阳科吉高新材料有限责任公司提供, 其断裂伸长率大于 10%。

2.2 T700 碳纤维单丝拉伸强度和 Weibull 参数测试

本文依据 ISO 11566 进行单丝拉伸试验, 按照标准要求, 将试件利用环氧胶粘剂固定在试样卡上, 如图 3 所示。

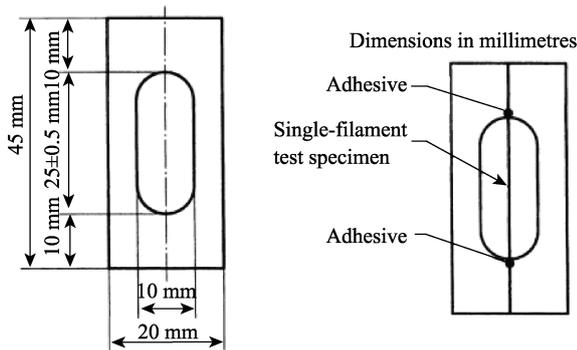


图 3 碳纤维单丝拉伸试样

Fig.3 Carbon fiber single-filament specimen

具体试验步骤: 1) 将单丝放在长度为 (25 ± 0.5) mm 的试样衬狭槽的中间, 用胶粘剂 (LY1564 SP 和固化剂的质量比为 100 : 41) 使试样与试样衬牢固地结合在一起; 2) 设定拉伸试验机十字头移动速度, 速度为 3 mm/min; 3) 夹紧试样衬, 应使试样与加载轴线同轴; 4) 加载前, 剪断试样衬的两侧; 5) 启动试验机, 加载至试样破坏, 记录载荷-伸长曲线。试验过程如图 4 所示。

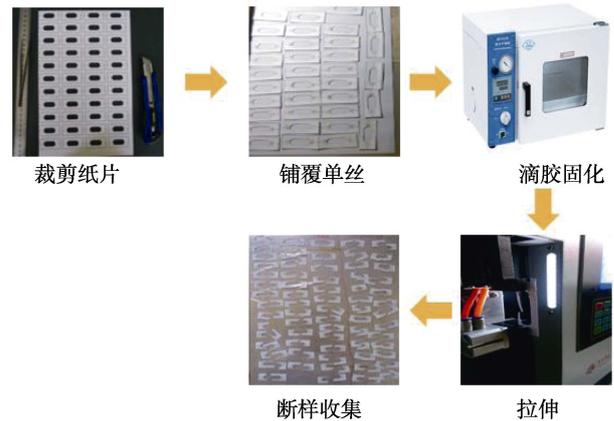


图 4 单丝拉伸试验过程

Fig.4 Single-filament tensile procedure

由于碳纤维脆性大, 单丝拉伸试验中存在抽单丝、剪断纸片等过程中提前破坏, 可能因未完全固定在纸片上而从纸片拉脱, 因此试验成功概率不高, 且与操作人员素质相关程度高。为使试验有较高的置信度, 针对 T700 纤维, 准备 70 个试样, 保证有效试样不少于 30 个。

2.3 T700 碳纤维与 E51/D400 环氧树脂界面剪切强度

将碳纤维单丝平直地沿着哑铃形凹槽的中心线铺覆, 为保证纤维被拉直, 在纤维的末端连接一定质量的金属片。分别向哑铃形凹槽里浇注 E51/D400 环氧树脂和铺放 PPS 树脂粉末, 经升温后固化成形。其中, E51/D400 环氧树脂制作的为透明样条, PPS 树脂制作的为不透明棕色样条。试样厚度为 2 mm, 有效长度为 30 mm, 如图 5 所示。

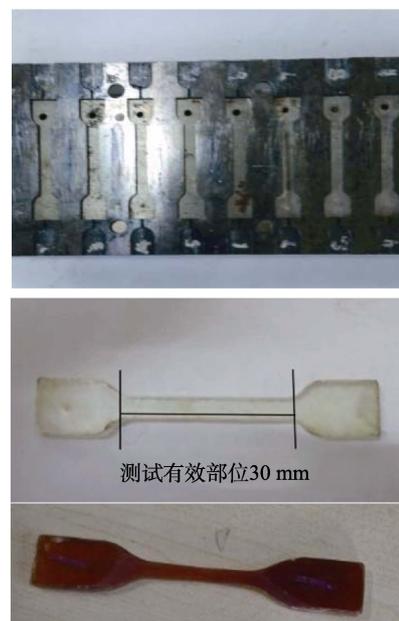


图 5 单丝断裂试样

Fig.5 SFFT specimen

将试样的哑铃头部分用砂纸打磨，以防拉伸打滑，试验拉伸速率设定为 0.3 mm/min。将试样夹持在力学试验机上后，把声发射传感器粘贴到试样表面，如图 6 所示。为了令声发射传感器更好地接收声波信号，并降低探头随拉伸变形带来的摩擦噪声，需要在声发射传感器表面涂抹耦合剂。在拉伸达到 5%应变时，停止试验，确保碳纤维达到饱和和断裂。



图 6 声发射监测拉伸破坏
Fig.6 Tensile process monitored by AE

拉伸完成后，将 E51/D400 环氧树脂样条置于偏光显微镜下观察纤维断点，如图 7 所示。

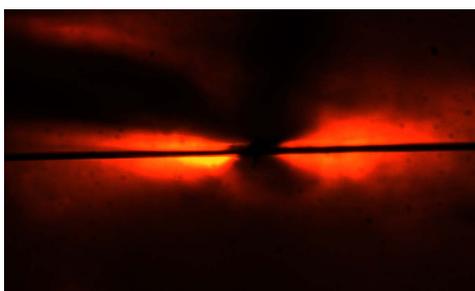


图 7 偏光显微镜及纤维断点照片
Fig.7 Polarized-light microscope and polarized-light photograph of carbon fiber fragment

3 结果及分析

3.1 T700 碳纤维单丝拉伸强度及 Weibull 参数计算

对 T700 碳纤维单丝拉伸的载荷-拉伸曲线如图 8 所示。

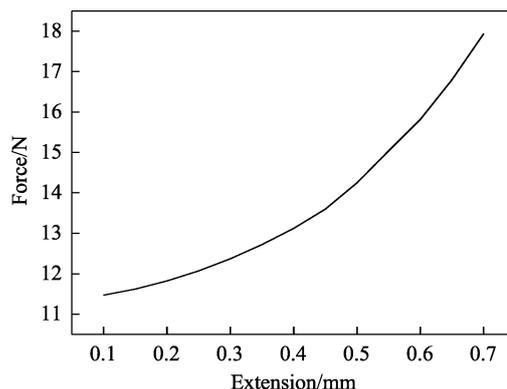


图 8 载荷-拉伸曲线
Fig.8 Load-tensile curve

碳纤维单丝拉伸强度存在较大的离散性，根据 Weibull 强度分布理论，碳纤维单丝的强度服从 Weibull 规律：

$$P_f(\sigma, L) = 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

式中： $P_f(\sigma, L)$ 表示长度为 L 的纤维单丝在外载应力 σ 作用下发生断裂的概率； L_0 为纤维的特征长度； σ_0 为在特征长度 L_0 下的特征强度； m 为 Weibull 形状参数。

为确定 Weibull 形状参数 m 和尺度参数 σ_0 ，一般采用 Weibull 双对数线性式，即对式 (5) 移项后取 2 次对数得 ($L=L_0$)：

$$\ln[-\ln(1-P)] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (5)$$

其中失效概率 P 的一般表达式为：

$$P = \frac{i - \alpha}{N - \beta} \quad (6)$$

式中： i 为碳纤维强度从低到高排列的序数； N 为碳纤维强度样本个数；参数 α 和 β 在文中分别取 0.5 和 0。

然后对 $\ln \ln[1/(1-P)] - \ln \sigma$ 作图进行线性拟合，利用最小二乘法即可得到形状参数 m 以及尺度参数 σ_0 的数值。将 T700 碳纤维拉伸强度进行概率统计，作出概率累计分布图和双对数线性拟合直线。

通过图 9 可知，T700 碳纤维的单丝拉伸强度和 Weibull 双对数线吻合良好。经计算，有效个数 N 为 42，形状参数为 m 为 5.35，拉伸强度 σ_0 为 4 026 MPa，线性拟合方差 R^2 为 0.929。

3.2 T700/E51 环氧树脂界面性能评估

如图 7 所示，在偏光纤维镜的观察下，被拉断的碳纤维单丝由于受载时应力分布和周围不同，因此会产生双折射花纹。用显微镜观察 30 组有效试样的平均纤维断点数目以及平均纤维断裂长度等，通过式 (1) — (3) 可以计算出临界断裂长度下的纤维强度 σ_f 和界面剪切强度 τ 。断点数目为 57， $\sigma_f=7\ 910$ ， $d_f=8.1\ \mu\text{m}$ ， $l_c=517\ \mu\text{m}$ ， $\tau=46.47\ \text{MPa}$ 。

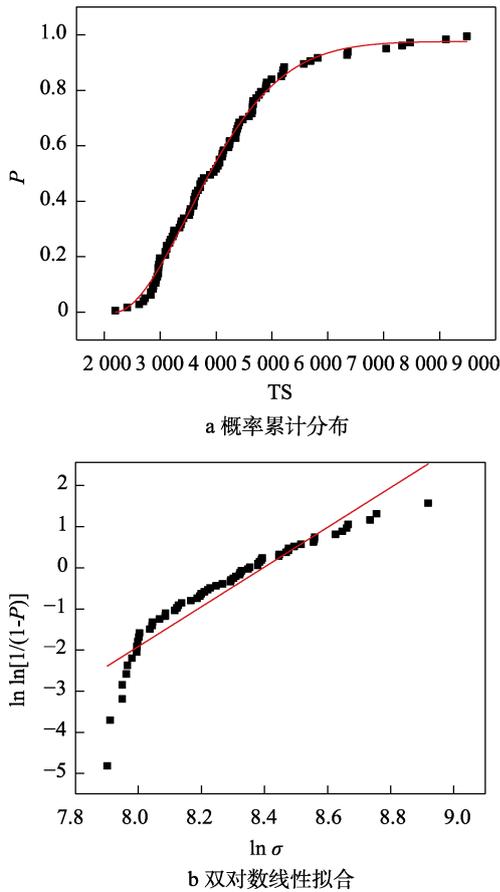


图 9 概率累计分布图和双对数线性拟合直线图
Fig.9 Cumulative distribution of probabilities (a) and a linear plot (b) of double logarithmic linear fitting σ_0

使用声发射进行试验监测, 可供选择的声发射特征参数较多, 具体包括信号幅值、持续时间、上升时间、振铃计数、能量、峰值频率等。有研究表明^[17-18,23-24], 声发射信号的幅值与材料破坏模式有关, 一般来说, 低幅值对应的是树脂开裂, 中等幅值对应纤维和树脂的脱粘, 而高幅值对应纤维的断裂, 但对于不同类型的纤维和树脂, 幅值的数值有所不同^[17-18]。能量代表着损伤程度的高低, 这在树脂基复合材料的破坏监测中得到充分验证^[18-19,21,23,25]。本文选择使用声发射信号中的幅值和能量作为评价纤维断裂的特征。

纯 E51 树脂以及 T700/E51 单丝断裂的声发射信号能量-幅值特征如图 10 所示。从图 10a 中可以看出, 纯树脂的声发射信号幅值在 63 dB 以下, 能量在 42 mV·ms 以内。基于此, 在含有 T700 纤维的试样断裂过程中, 筛选出能量高于 42 mV·ms, 而幅值高于 63 dB 的碳纤维断裂信号, 通过测定的纤维断点数量, 计算出相应的界面剪切强度。

使用声发射技术确认纤维断裂数量与通过显微镜观察的数量分别为 55、57, 测算的界面剪切强度分别为 44.03、46.47 MPa, 偏差在 5.5%左右, 偏差较小, 说明使用声发射技术通过单丝断裂法来测量

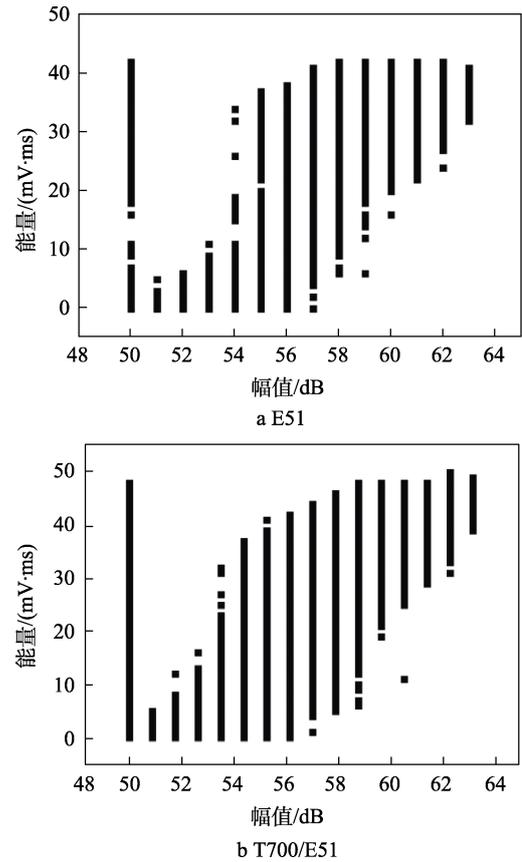


图 10 声发射信号能量-幅值
Fig.10 AE signal energy-amplitude

T700/E51 的界面性能具有可靠性。然而, 从图 10 中可以了解到, 在该测试中, 相比于树脂基体的破裂, 纤维断裂声发射信号的幅值和能量并没有特别明显的提高, 与其他文献报道有一定差异^[17-18], 这说明东丽 T700 纤维与 E51 树脂的单丝断裂特征有一定的独特性。另外, 和显微镜观察的断点数量相比, 声发射采集的纤维断点数量普遍较少, 这可能与测试夹具本身产生摩擦噪声形成信号干扰有关。

3.3 T700/聚苯硫醚树脂界面性能评估

纯 PPS 树脂以及 T700/PPS 单丝断裂的声发射信号能量-幅值特征如图 11 所示。从图 11a 中可以看出, 纯树脂的声发射信号幅值在 65 dB 以下, 能量在 540 mV·ms 以内。基于此, 在含有 T700 纤维的试样断裂过程中, 筛选出能量高于 540 mV·ms, 而幅值高于 65 dB 的碳纤维断裂信号, 通过测定的纤维断点数量, 计算出相应的界面剪切强度。与 E51 树脂相比, PPS 树脂破坏时声发射信号的幅值变化不大, 但其能量却有明显的提升, 这体现了不同树脂之间声发射信号的差异, 也与相关文献的报道相吻合^[26]。与 T700/E51 树脂单丝断裂信号相比, T700/PPS 树脂样条中纤维断裂和树脂开裂信号的能量差异更大, 因此类似 T700/E51 中纤维断裂信号被掩盖的情况更少见, 相对而言测试数值更准确。

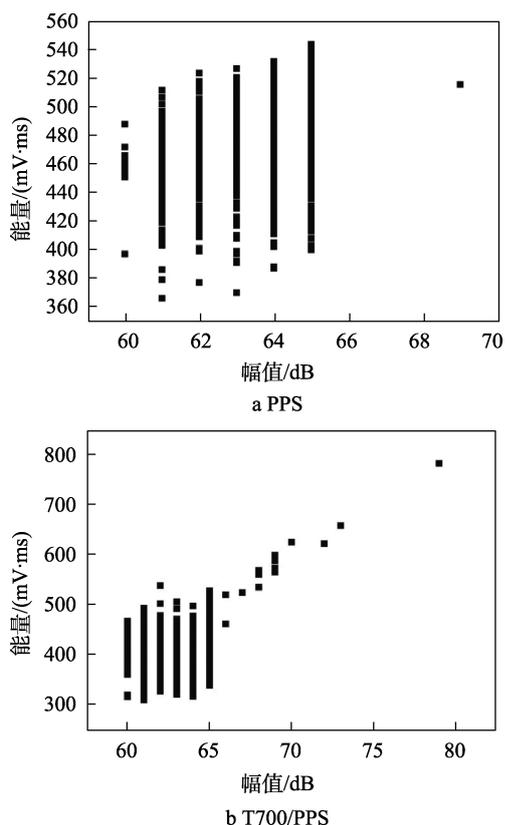


图 11 声发射信号能量-幅值特征
Fig.11 AE signal energy-amplitude

声发射监测 30 组有效试样的平均纤维断点数目为 43, $\sigma_f=7\ 472\ \text{MPa}$, $d_f=8.2\ \mu\text{m}$, $l_c=687\ \mu\text{m}$, $\tau=33.43\ \text{MPa}$ 。可以看出, 对东丽 T700 碳纤维而言, 与 PPS 树脂的界面强度较与 E51 树脂的界面强度低得多。分析原因, 一方面是 PPS 树脂普遍对碳纤维的浸润效果不佳, 导致界面结合性较差^[27-28], 这通过宏观样条的层间剪切测试等力学数据也可以体现^[29]; 另一方面可能是由于制样过程中 PPS 树脂粉末直接熔融固化, 无法通过抽真空排除内部气体, 导致试样内部气泡和孔隙缺陷较多, 降低了界面性能。

4 结论

1) 经过和显微镜观察对比, 确认声发射技术能够有效应用于 T700 碳纤维单丝和 E51 树脂的界面性能评估上, 其整体偏差在 5.5% 左右。

2) 声发射信号的能量和幅值能够有效评估碳纤维单丝和树脂的界面性能, 其中对于东丽 T700 碳纤维和 E51 树脂, 纤维断裂的声发射信号特征为能量高于 42 mV·ms, 幅值高于 63 dB, 对于东丽 T700 碳纤维和 PPS 树脂, 纤维断裂的声发射信号特征为能量高于 540 mV·ms, 而幅值高于 65 dB。

3) PPS 树脂与 E51 树脂的树脂破裂声发射信号特征存在差异, 体现在两者幅值基本一致, 能量相差较大, 表明声发射技术可以作为在多元组合树脂环境

下的无损检测方法。

4) 使用声发射技术测量东丽 T700 碳纤维和不透明的 PPS 树脂界面剪切强度为 33.43 MPa, 表明该技术在测量纤维和不透明树脂界面性能方面具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 冯利军, 程正冲, 李伏. 船用复合材料应用现状及发展[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 51-55.
FENG Li-jun, CHENG Zheng-chong, LI Fu. Application and Development of Composites for Naval Ships[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 51-55.
- [2] 于祺, 陈平, 陆春, 等. 空间环境下碳纤维/双马树脂基复合材料的性能演化及损伤机理[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 1-7.
YU Qi, CHEN Ping, LU Chun, et al. Property Evolution and Damage Mechanism of CF/BMI Composite in Space Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 1-7.
- [3] 缙建杰, 熊俊, 朱丽, 等. 航空用碳纤维增强树脂基复合材料低温环境下弯曲性能变化研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 94-97.
GOU Jian-jie, XIONG Jun, ZHU Li, et al. Flexural Properties of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites for Aviation at Low Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 94-97.
- [4] 郭健, 张天翼. 海军航空器用树脂基复合材料海洋环境老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 102-108.
GUO Jian, ZHANG Tian-yi. Research Overview on Aging Behaviours of Resin Matrix Composites for Naval Aircrafts in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 102-108.
- [5] 陈源, 李小平, 罗勇, 等. 包装箱用碳纤维增强复合材料贮存寿命研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 111-114.
CHEN Yuan, LI Xiao-ping, LUO Yong, et al. Storage Life of Carbon Fiber Reinforced Composite of Packing Box[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(8): 111-114.
- [6] 王章文, 张军, 方国东, 等. 界面层对纤维增韧陶瓷基复合材料力学性能影响的研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(1): 77-89.
WANG Zhang-wen, ZHANG Jun, FANG Guo-dong, et al. Effect of Interfacial Layer on Mechanical Properties of Fiber Toughened Ceramic Matrix Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(1): 77-89.
- [7] 武海生, 孙志杰, 贾晶晶, 等. 高性能有机纤维单丝复合体系界面粘结性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(4): 59-63.
WU Hai-sheng, SUN Zhi-jie, JIA Jing-jing, et al. Ex-

- perimental Study on the Interfacial Bonding Properties of High-Performance Organic Fibers in Single Fiber Fragmentation Test[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(4): 59-63.
- [8] 赵晨, 陈跃良, 刘旭. 湿热条件下飞机聚合物基复合材料界面问题研究进展[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(5): 62-66.
ZHAO Chen, CHEN Yue-liang, LIU Xu. Research Progress of Interface of Polymer Matrix Composites for Aircraft in Hot and Humid Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(5): 62-66.
- [9] 陈跃良, 刘旭. 聚合物基复合材料老化性能研究进展[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(4): 49-56.
CHEN Yue-liang, LIU Xu. Progress of Aging Performance Research of Polymer Matrix Composites[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(4): 49-56.
- [10] 李超, 陈孝银, 牟献良. TDE-85 环氧/碳纤维复合材料热老化试验研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(6): 36-38.
LI Chao, CHEN Xiao-yin, MU Xian-liang. Study of TDE-85 Epoxy/Carbon Fiber Composite Material by Thermal Ageing Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(6): 36-38.
- [11] 王琦, 檀琳琳, 王洁. 碳纤维环氧复合材料盐雾老化试验研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(5): 39-42.
WANG Qi, TAN Lin-lin, WANG Jie. On Salt Fog Weathering of Carbon Fiber Epoxy Composite Material[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(5): 39-42.
- [12] 王零森, 罗雄, 陈熙, 等. 复合材料的界面强度及测定方法[J]. *材料研究学报*, 1994, 8(4): 372-377.
WANG Ling-sen, LUO Xiong, CHEN Xi, et al. Study on Interface Bond Strength of Composites and Its Testing[J]. *Chinese Journal of Material Research*, 1994, 8(4): 372-377.
- [13] KELLY A, TYSON W R. Tensile Properties of Fibre-Reinforced Metals: Copper/Tungsten and Copper/Molybdenum[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(6): 329-350.
- [14] 王伟霞, 顾轶卓, 李敏, 等. 单丝断裂双树脂法研究碳纤维/环氧树脂界面粘结性能[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(4): 1-6.
WANG Wei-xia, GU Yi-zhuo, LI Min, et al. Characterization of Interfacial Bonding Property of Carbon Fiber/Epoxy Resin Using Single Fiber Fragmentation Test with Dual Matrix Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(4): 1-6.
- [15] 陶然, 夏美玲, 丁鹏, 等. 玻纤增强树脂基复合材料声发射研究[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(8): 89-91.
TAO Ran, XIA Mei-ling, DING Peng, et al. Acoustic Emission Research on Glass Fiber Reinforced Composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(8): 89-91.
- [16] 李骞翮, 高彦涛, 刘书华. 声发射技术在纤维材料领域的应用研究进展[J]. *纺织导报*, 2022(4): 81-85.
LI Qian-he, GAO Yan-tao, LIU Shu-hua. Research Progress on the Application of Acoustic Emission Technology in Fiber Materials[J]. *China Textile Leader*, 2022(4): 81-85.
- [17] MONTI A, EL MAHI A, JENDLI Z, et al. Mechanical Behaviour and Damage Mechanisms Analysis of a Flax-Fibre Reinforced Composite by Acoustic Emission[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 100-110.
- [18] SAEEDIFAR M, ZAROUCAS D. Damage Characterization of Laminated Composites Using Acoustic Emission: A Review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 195: 108039.
- [19] PARK J M, KIM J W, YOON D J. Comparison of Interfacial Properties of Electrodeposited Single Carbon Fiber/Epoxy Composites Using Tensile and Compressive Fragmentation Tests and Acoustic Emission[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 247(1): 231-245.
- [20] 隋晓东, 吴凯文, 李焱, 等. 基于声发射技术的单丝复合材料界面性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28(1): 53-59.
SUI Xiao-dong, WU Kai-wen, LI Ye, et al. Study on Interfacial Properties of Single Fiber Composites by Acoustic Emission[J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28(1): 53-59.
- [21] PARK J M, SHIN W G, YOON D J. A Study of Interfacial Aspects of Epoxy-Based Composites Reinforced with Dual Basalt and SiC Fibres by Means of the Fragmentation and Acoustic Emission Techniques[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(3): 355-370.
- [22] TRIPATHI D, JONES F R. Single Fibre Fragmentation Test for Assessing Adhesion in Fibre Reinforced Composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33(1): 1-16.
- [23] 李伟, 付玉, 蒋鹏, 等. 基于K均值聚类的FRP复合材料容器损伤声发射信号模式识别[J]. *压力容器*, 2014, 31(8): 14-19.
LI Wei, FU Yu, JIANG Peng, et al. Pattern Recognition of Acoustic Emission Signals of FRP Composite Vessel Damage Based on K- Means Clustering[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2014, 31(8): 14-19.
- [24] LI Li, SWOLFS Y, STRAUMIT I, et al. Cluster Analysis of Acoustic Emission Signals for 2D and 3D Woven Carbon Fiber/Epoxy Composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(14): 1921-1935.
- [25] 郑洁, 姚磊江, 程起有, 等. 复合材料损伤的声发射试验研究[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(11): 1478-1481.
ZHENG Jie, YAO Lei-jiang, CHENG Qi-you, et al. Acoustic Emission Characteristics in Composites during Experimental Research[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(11): 1478-1481.
- [26] CARVELLI V, D'ETTORRE A, LOMOV S V. Acoustic Emission and Damage Mode Correlation in Textile Rein-

- forced PPS Composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 163: 399-409.
- [27] 武博, 杨常玲, 张琳萍, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面性能的研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(3): 117-121.
WU Bo, YANG Chang-ling, ZHANG Lin-ping, et al. Research Progress on Interfacial Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(3): 117-121.
- [28] 陈平, 于祺, 孙明, 等. 高性能热塑性树脂基复合材料的
的研究进展[J]. *纤维复合材料*, 2005, 22(2): 52-57.
CHEN Ping, YU Qi, SUN Ming, et al. Advances in High Performance FRTP Composites[J]. *Fiber Composites*, 2005, 22(2): 52-57.
- [29] 曾汉民, 何国仁. 聚苯硫醚及其碳纤维复合材料的破坏形态[J]. *宇航学报*, 1983, 4(2): 14-21.
ZENG Han-min, HE Guo-ren. The Fracture Morphologies of Polyphenylene Sulfide and Its Carbon Fibre Composites[J]. *Journal of Astronautics*, 1983, 4(2): 14-21.

责任编辑: 刘世忠