



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404015

引用格式:罗辉,王泽良,曾文广,等.基于声发射的纤维增强复合材料研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(11):4397-4410.

Luo Hui, Wang Zeliang, Zeng Wenguang, et al. Research progress of fiber reinforced composites based on acoustic emission[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4397-4410.

石油、天然气工业

## 基于声发射的纤维增强复合材料研究进展

罗辉<sup>1</sup>, 王泽良<sup>1</sup>, 曾文广<sup>1</sup>, 苗嘉旭<sup>2</sup>, 庄明璋<sup>2</sup>, 杨东海<sup>2\*</sup>, 王照亮<sup>2</sup>

(1. 中石化西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580)

**摘要** 纤维增强复合材料(fiber reinforced composite, FRP)在制作使用过程中由于撞击损伤、疲劳积累等问题,导致内部结构发生不可逆的细微损伤,声发射技术(acoustic emission, AE)以其高精度、实时性,成为监测其损伤演化和失效机制的重要手段。综述了近年来声发射技术在FRP损伤表征中的应用,通过对参数分析、波形分析、模式分析及深度学习分析等AE技术手段展开研究,结果表明参数分析与波形分析可以针对检测过程中的信号特征进行互补,实现了对复合结构变形、断裂等损伤行为的定性描述,深度学习分析等方法为纤维增强复合材料的健康监测和寿命预测提供了重要理论支持。综合来看,声发射技术能够实时监控和评估运行中的复合材料结构,对于维护FRP材料健康状况、预防突发性故障具有巨大的发展潜力,未来可以进一步结合人工智能技术以提高损伤识别的准确性和效率。

**关键词** FRP复合材料; 声发射; 损伤分析; 信号分析; 深度学习

**中图分类号** TE88 X937; **文献标志码** A

### Research Progress of Fiber Reinforced Composites Based on Acoustic Emission

LUO Hui<sup>1</sup>, WANG Ze-liang<sup>1</sup>, ZENG Wen-guang<sup>1</sup>, MIAO Jia-xu<sup>2</sup>, ZHUANG Ming-zhang<sup>2</sup>,  
YANG Dong-hai<sup>2\*</sup>, WANG Zhao-liang<sup>2</sup>

(1. Sinopec Northwest China Petroleum Bureau, Urumqi 830011, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China)

**[Abstract]** During the manufacturing and application of fiber-reinforced composites (FRP), issues such as impact damage and fatigue accumulation cause irreversible subtle damage to the internal structure. Acoustic emission (AE) technology, with its high precision and real-time property, has become an important means to monitor the damage evolution and failure mechanisms of FRP. The applications of acoustic emission technology in the damage characterization of FRP in recent years was reviewed. By conducting research on AE technical means such as parameter analysis, waveform analysis, pattern analysis, and deep-learning analysis, the results showed that parameter analysis and waveform analysis could complement each other in terms of signal characteristics during the detection process, achieving a qualitative description of damage behaviors such as the deformation and fracture of composite structures. Methods such as deep-learning analysis provided important theoretical support for the health monitoring and life prediction of fiber-reinforced composites. Overall, acoustic emission technology can monitor and evaluate the composite structures in operation in real-time. It has great development potential for maintaining the health of FRP materials and preventing sudden failures. In the future, it can be further combined with artificial intelligence technology to improve the accuracy and efficiency of damage identification.

**[Keywords]** FRP composite materials; acoustic emission; damage analysis; signal analysis; deep learning

纤维增强复合材料(fiber reinforced composite, FRP)凭借其卓越的力学性能和显著的重量优势,应

用范围日益广泛。然而由于纤维增强复合材料的导热性与导电性较差,声衰减性较高,机械与物理

收稿日期: 2024-05-30 修订日期: 2024-10-29

基金项目: 中国石化国内上游导向项目(YTBXD-DMXX-2023-1-03-001-XB)

第一作者: 罗辉(1983—),男,汉族,新疆乌鲁木齐人,硕士,高级工程师。研究方向:油田生产运行、科学技术管理。E-mail: uoh\_xbsj@sinopec.com。

\*通信作者: 杨东海(1984—),男,汉族,山东青岛人,博士,教授。研究方向:多相流理论与分离技术,油气储运安全理论与技术。E-mail: yangdonghai12@163.com。

性能呈现各向异性等特点,导致其在无损检测方面与金属材料存在较大差异。且其制造工艺具有特殊性,参数微小变化就会导致其产生许多缺陷,铲平质量具有很强的离散性,影响其使用性能。

复合材料存在多种结构缺陷类型,但按照原理可分为两类:①损害构件性能:分层、夹杂、纤维断裂、气孔、基体裂缝、基体固化状态不良等;②损害构件的完整性:横向断裂、龟裂、脱黏等。这些损伤类型,都是重要的声发射源。声发射具有较宽的频率范围,几赫兹的次声频到数兆赫兹的超声频。幅度范围亦广泛,从微观位错运动的  $10^{-13}$  m 到地震波的 1 m 量级。声发射通过灵敏的传感器,对材料内部轻微损伤的信号进行实时动态监测,并对信号进行进一步处理与评价,进而评价损伤开始时间以及损伤状态,对材料进行完整性评价分析。

声发射检测较其他无损检测有两个基本的特点:①敏感于动态缺陷;②声发射波来自缺陷损伤过程中的信号,可以得到丰富的信息,具有高灵敏度与高分辨率特征。该特点决定了其对缺陷进行实时动态监测,并据以评价缺陷的损伤程度,以及结构完整性评价和寿命预测。对于大型纤维增强复合材料构件可以进行传感器布置,一次加载,可以进行缺陷定位监测,操作简便,减少人工成本。且声发射对于被检测工件的接近要求不高,可以应用于复杂工况中进行实时监测,如易燃、易爆、辐射、极端温度和极毒等环境下。也适用于复杂结构的构件损伤。几乎所有材料在变形和断裂时均产生声发射,适用范围广。由于声发射的高灵敏度和精度,连续在线监测能力以及适应性强的特点。针对声发射对于纤维增强复合材料的无损检测进展进行相应的研究分析,总结声发射在纤维增强复合材料诊断过程中已有分析方法的特点,并针对声发射技术在纤维增强复合材料中发展趋势进行相应的展望,为其在纤维增强复合材料检测领域中的应用提供技术参考。

## 1 纤维增强复合材料及声发射技术优势

### 1.1 纤维增强复合材料

随着工业的发展,单一材料的性能、成本、耐久性等局限性暴露出来。于是,多种特性材料组合的复合材料备受青睐,其中以 FRP 应用最为广泛。纤维增强复合材料主要有两种:天然的和合成的<sup>[1]</sup>。纤维增强聚合物复合材料历来使用合成纤维,主要由增强纤维材料和基体材料构成(图 1)。在热塑性或热固性材料中增强玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等高强模量纤维的复合材料<sup>[2]</sup>,通过真空注塑、拉

挤、模压、树脂传递等不同的成型工艺<sup>[3]</sup>,兼具纤维的高强度、刚性、耐冲击和耐疲劳等性能和基体材料的耐腐蚀、耐高温、耐化学性等性能,同时具有轻质性、环保和可持续性、维修方便、可设计性强等优异性能。广泛应用于航空航天、风电、军事、汽车、石油、化工、建筑结构、消费电子等领域,以其轻质、高强、耐腐蚀等特性满足不同的应用需求<sup>[4-7]</sup>。纤维增强复合材料组成如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

其中,在风电行业,风电叶片大部分以玻璃增强复合材料为主<sup>[9]</sup>。在航空航天领域,民用客机增强复合材料用量占整机重量 50% 以上。在石油行业中,纤维增强复合管道的使用也在与日俱增,油气集输管道中非金属占到 13% 以上,部分油田比例超过 30%,其中主要以玻璃钢管道为主,复合材料结构因其性能有点,其服役环境往往恶劣且复杂,其中影响因素主要包括湿度、盐度、辐射、温度、酸碱度等,纤维增强材料的损伤形式和特征主要如表 1 所示。

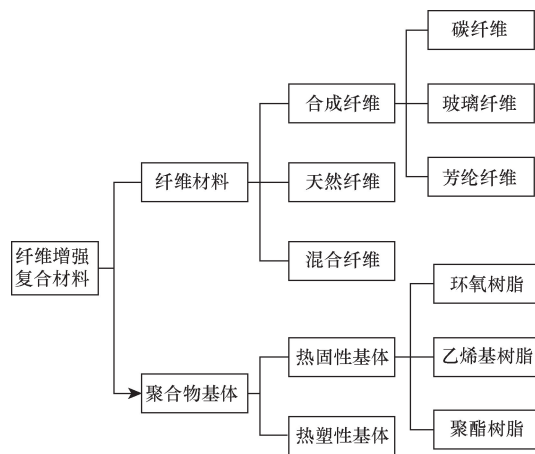


图 1 纤维增强复合材料组成<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Composition of fiber reinforced polymer<sup>[8]</sup>

表 1 纤维增强材料损伤

Table 1 Fiber reinforced material damage

损伤形式	特征
基体开裂	这是复合材料中常见的一种损伤形式,通常是指复合材料中的树脂基体部分出现裂纹。基体开裂可能会影响材料的完整性和承载能力
分层	分层是指复合材料层合板中不同层之间的分离。这种损伤形式在复合材料中尤为常见,尤其是在受到冲击或疲劳载荷时。分层会严重影响材料的层间剪切强度和整体性能
纤维断裂/拔出	指纤维层与基体之间的附着力依然很强,但是在一定的外力作用下,纤维层与基体分离,纤维断裂的过程,纤维是复合材料的主要承载组分,纤维断裂/拔出会导致材料的整体强度下降,是最严重的损伤形式之一
基体/纤维脱黏	纤维层与基体之间的附着力减弱,纤维层与基体脱离的过程

## 1.2 声发射在纤维增强材料使用过程中的优势

早期在 FRP 中有限使用声发射的原因部分是由于 FRP 的非各向同性,声发射的传统的原则不适用于他们。例如,20 世纪 50 年代对各向同性材料提出了 Kaiser 效应<sup>[10]</sup>,即声发射信号本质上是不可逆的,只有在超过前一个最大载荷后才会会在后续加载中发射。由于声发射描述符的进步,表征复合材料已经成为可能。Liptai 发现在检测玻璃纤维复合材料结构中的疲劳和断裂过程时<sup>[11]</sup>,Kaiser 效应不再有效,因此引入了 Felicity 比,在复合材料结构中又被称为 Felicity 效应,如图 2 所示<sup>[12]</sup>。通过费利西蒂效应,在随后的加载周期中,甚至在达到初始最大载荷之前,FRP 中就产生了声学事件,声发射手段得以广泛运用与 FRP 检测上。

尽管复合材料损伤形式存在不同的复杂性,但是有一个共同点,就是缺陷出现与发展有较强的声发射特征,声发射对 FRP 材料缺陷的起始以及扩展具有特定的敏感性和时效性,及其动态检测强度和评估剩余强度的独特能力。声发射技术不仅可以检测复合材料而言内部缺陷与损伤,且已经成为材料性能研究、完整性检测与剩余寿命评估不可缺少的方法<sup>[13-14]</sup>。对于其他无损检测(涡流、射线、超声等)对于复杂且微小的缺陷很难实时监测。声发射手段弥补了这一技术难点,其基本原理如图 3 所示<sup>[15]</sup>。

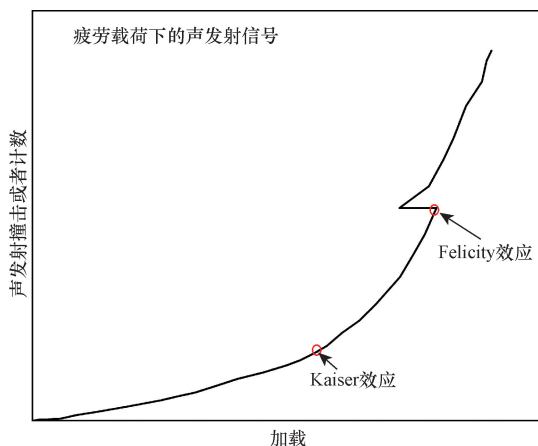


图 2 Kaiser 效应和 Felicity 效应  
Fig. 2 Kaiser effects and Felicity effects

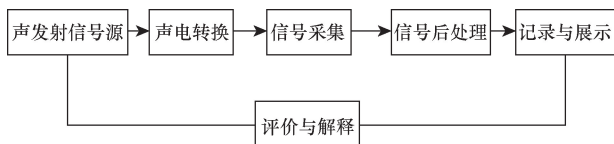


图 3 声发射技术基本原理<sup>[15]</sup>  
Fig. 3 Basic principle of acoustic emission technology<sup>[15]</sup>

## 2 声发射参数分析

声发射特征参数是指提取出来具有描述波形特征的某些声发射参数,更方便地对各波形进行比较。信号的主要来源包括待测结构在不同加载模式下产生的塑性变形、裂纹萌生和扩展、断裂、纤维脱黏和拉拔、复合材料分层等。这些信号经过放大器放大,通过低、高带通滤波器滤波后,转换为声发射描述符,如幅值、峰值幅度、能量,并提取上升时间、持续时间、计数等特征<sup>[16]</sup>。

### 2.1 幅度计数分析法

信号峰值幅度和幅度等反应信号的强度,对该参数的分布分析可以反映出声发射源的大量信息,其分布和材料形变等都有很大关系。

经过大量实验得到声发射信号的幅度、事件和振铃计数关系为

$$N = \frac{Pfy}{b} \quad (1)$$

式(1)中: $N$ 为累加振铃计数; $P$ 为事件总计数; $f$ 为换能器的响应频率; $\gamma$ 为声发射事件总数; $b$ 为幅度分布斜率。

在 FRPs 中,最常用的声发射(acoustic emission, AE)描述符是识别损伤进展类型的峰值振幅。峰值振幅表示在记录的声波波形中相对于前置放大器设置的参考电压  $U_{ref}$  的最大电压峰值  $U_{max}$ 。峰值振幅  $A$  (dB) 可以表示为

$$A = 20 \lg \frac{U_{max}}{U_{ref}} \quad (2)$$

20 世纪 90 年代就发现低振幅与基体开裂有关,中等振幅与分层有关,高振幅与纤维断裂有关<sup>[17]</sup>。Jung 等<sup>[18-19]</sup>研究了  $b$  值(定义为 AE 振幅的累积分布函数的斜率值)和  $I_b$  值(使用 AE 振幅的累积分布函数在平均值和标准偏差处的斜率来定义)的应用。在研究中发现, $b$  值以指示传感器到损伤距离的变化,因此可以确定传感器到断裂处的最佳位置。与  $b$  值相比, $I_b$  值通过对振幅分布的统计分析提供更可靠的结果。对于故障模式分类,使用  $I_b$  值比使用完整的 AE 数据能更快地分析出试件出现的异常情况。此外,在大多数研究中,振幅分布存在一定的重叠区域,使得该振幅范围与损伤机制的关联不确定。且受传感器距离以及非金属材质的影响较大,距离越近幅值越大,且材质的层数越多材质,排列方式越复杂,损伤时声发射收集的幅值越大。部分研究结果如表 2 所示,振幅分布随测试类型(拉伸、弯曲、疲劳等)、传播介质的材料特性(成分、结构等)而变化。树脂或基体开裂通常幅值为

表2 FRP中与失效模式相关的峰值振幅  
Table 2 Peak amplitudes associated with failure modes in FRP

试样类型	损伤形式	峰值振幅/dB
CFRP-[0°/90°] <sub>4s</sub> <sup>[22]</sup>	纵向基质裂纹	50~60
	纤维/基体界面裂纹	60~70
	纤维断裂	80
	中心孔附近纤维断裂	80~100
	其他部位的纤维断裂	70~80
CFRP-[0°/45°/90°/-45°] <sub>2s</sub> <sup>[22]</sup>	中心孔附近纤维/基体界面裂纹	80
	基体微裂纹	50~60
	进一步分层	70
	胶粘层剪切破坏	40~45
FRP 双搭接接头 <sup>[23]</sup>	基体开裂	40~45
	纤维/基体界面脱黏	40~60
	层间分层	40~70
	纤维断裂	50~90
30°CFRP 层合板 <sup>[24]</sup>	基体开裂和纤维断裂	35~100
	纤维-基体脱黏	100
玻璃纤维/环氧树脂-2D <sup>[25]</sup>	基体开裂	35~55
	基体/纤维脱黏	55~100
	纤维断裂	35~80

低振幅(40~70 dB),纤维失效则为高振幅(60~100 dB)。界面脱黏破坏则介于55~70 dB。对于各种损伤模式,大多数作者给出的振幅范围是相互矛盾的<sup>[20]</sup>。为此,一些作者将振幅与能量结合起来<sup>[21]</sup>,另一些作者将振幅与上升时间、能量和持续时间结合起来。

## 2.2 频率计数分析法

与峰值幅度相关的另一个常用的声发射描述符是峰值频率。峰值频率 $F_p$ 是记录声事件的功率谱中的最大幅度。考虑质心频率 $F_c$ 比考虑峰值频率对功率谱更有意义。频率质心是频率含量的加权平均值,可以表示为

$$F_c = \frac{\sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} U(f)f}{\sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} U(f)} \quad (3)$$

式(3)中: $U(f)$ 为频谱 $f$ 各点处的频谱幅值; $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为最小和最大频谱频率。由于传感器的共振特性,一些研究人员使用加权峰值频率并结合频率质心来表征FRP的损伤进展。加权峰值频率可表示为

$$F_{wp} = \sqrt{F_c F_p} \quad (4)$$

声发射信号的整个频率组成是潜在失效机制的特征,特征频谱可归因于所涉及材料的密度和刚度<sup>[26]</sup>。结合几个基于频率的特征来识别和分类各种失效机制是有用的。Gutkin等<sup>[27]</sup>利用SOM(self-

organizing map)和 $K$ 均值相结合测试增强纤维断裂过程的频率内容,通过C-Scan分析了破坏后的试样,以确定损伤的进展和破坏模式。使用模式识别技术将峰值频率分为5种不同的模式:I(0~50 kHz),II(50~150 kHz),III(200~300 kHz),IV(400~500 kHz)和V(500~600 kHz),如图4所示<sup>[27]</sup>。Liu等<sup>[28]</sup>采用声发射(AE)信号分析方法,通过 $K$ -means++聚类分析确定了典型失效模式的峰值频率范围:基质开裂(0~160 kHz)、纤维/基体脱黏(160~220 kHz)、纤维拔出(220~300 kHz)和纤维断裂(300~450 kHz)。应晶华<sup>[29]</sup>在针对碳纤维/环氧树脂复合材料层合板中的分层损伤研究,通过聚类结果揭示了不同损伤机制的声发射信号的频率范围:基体开裂(15~100 kHz),纤维/基体脱黏(100~218 kHz),纤维断裂(226~350 kHz)和平纹织物滑移(15~100 kHz)。丁瀛<sup>[30]</sup>对纤维增强复合材料的损伤类型——基体损伤、分层、脱黏和纤维断裂进行分析。结果表现,基体损伤(<80 kHz);分层信号(80~220 kHz);脱黏信号(220~350 kHz);纤维断裂信号(>350 kHz)。

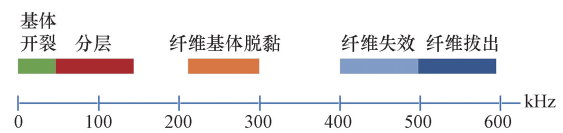


图4 模式损伤频率分布<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Distribution of mode damage frequency<sup>[27]</sup>

## 2.3 能量计数分析法

上述计数法已受到材料的形状、传感器的性能影响,而能量分析可以克服上述问题,因此采用能量可以更好地分析连续声发射信号。

能量与波形面积成正比,采用方均根电压 $U_{rms}$ 或均方电压 $U_{ms}$ 表示,定义为

$$U_{rms} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} U^2(t) dt \quad (5)$$

$$U_{ms} = \sqrt{U_{rms}} \quad (6)$$

式中: $\Delta T$ 为平均时间; $U(t)$ 为随时间变化的信号电压。

得到 $U_{ms}$ 随时间变化正比能量变化率,在 $t_1 \sim t_2$ 总能量 $E$ 计算公式为

$$E \propto \int_{t_1}^{t_2} U_{rms}^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} U_{ms} dt \quad (7)$$

声发射能(acoustic emissions energy, EAE)被广泛用于表征FRP的力学性能。它是由Harris等<sup>[31]</sup>引入的,他们通过实验证明了它对声学计数和事件数的优越表征能力。后面的部分将提供更多细节。声发射能量可以通过对记录的声事件在一段时间

内的整流瞬态电压 ( $U_i$ ) 进行积分来估计。从  $0 \sim t_i$  时间段的声发射能量可以表示为

$$E_{AE} = \int_{t_0}^{t_i} U_i^2(t) dt \quad (8)$$

累积能量是相对的,不能在不同材料之间进行比较,尽管如此,它们可以有效地用于绘制伤害进程。一个试验得出的拉力试验结果的累积能量曲线不能与另一个重复的相同试验的累积能量曲线进行比较。

CEA (cumulative acoustic energy) 通常与拉伸试验的持续时间或试验试样在载荷或应变下的位移十字头相对应。大多数研究人员都使用了相同的公式,并通过声学事件预测了失效的关键区域。例如, Baker 等<sup>[32]</sup> 使用 CFRP (carbon fiber reinforced plastic) 试样在第一次记录声事件时的应力水平和 CEA 曲线陡增处的应力水平作为参数来识别试样的微开裂和宏观开裂。又如 Oskouei 等<sup>[33]</sup> 使用了每个事件记录的声能和 CEA 来绘制 FRP 的损伤进展。事件的声能如图 5 所示,作者也使用了 CEA。在任意长度的分层过程中,声发射能量的瞬态变化表明了 3 种不同结构试样损伤机制的差异。Xu 等<sup>[34]</sup> 探讨了界面脱键(纤维/基体界面脱键和黏合失效)和聚合物开裂(基体开裂和内聚失效)在所选 AE 特征的子空间中表现相似。Saedifar 等<sup>[35]</sup> 主要研究了层合复合材料的分层现象。提出了基于声发射方法的裂纹尖端局部化两种方法,即声发射累积能量法和声发射信号局部化法。与标准方法相比,这些方法具有更高的重复性。结果表明,声发射能量累积法可以运用于非金属裂纹增长以及分层上的预测。徐晓阳等<sup>[36]</sup> 提出了基于 AE 能量衰减系数的损伤评估方法,将衰减系数的时程变化定义损伤发展为 3 个阶段。

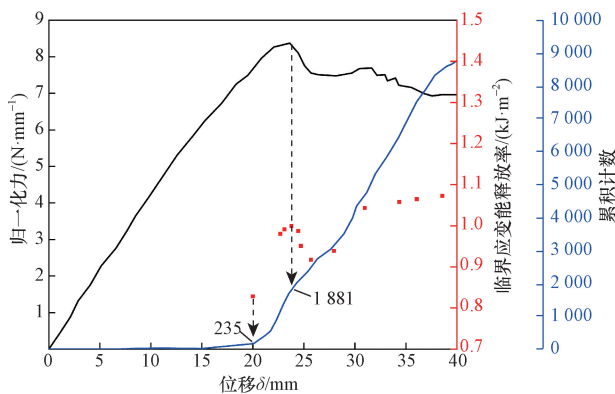


图 5 声发射声能积累图<sup>[33]</sup>

Fig. 5 AE sound energy accumulation diagram<sup>[33]</sup>

## 2.4 到达时间计数分析法

到达时间 (time of arrival, ToA) 是应力波/声波分析中最有效、最稳健的参数之一。Barile 等<sup>[37]</sup> 在

流行的赤池信息准则 (akaike information criterion, AIC) 的基础上,提出了一种估计声发射信号 ToA 的新方法。通过表征复合泡沫试件在拉伸载荷作用下的损伤演化阶段,验证了该方法的有效性。对静拉伸试验产生的声发射信号的 ToA 进行了估计,并用于分析。

Aggelis 等<sup>[38]</sup> 提出了另一种利用到达时间的有效方法,该方法测量波形的角度。他们引入了 RA (rise angle value) 值,即声发射事件的上升时间与峰值振幅的比值。该参数用于表征材料在加载下的剪切和拉伸事件。因为剪切作用产生的声发射事件上升时间较长,振幅较小,而拉伸作用产生的声发射事件上升时间较短,振幅较大。测试了环氧基玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 在堆叠顺序为  $[0^4/90^4]_4$  s 的交叉层合板中的 RA 值。通过绘制 RA 值与时间/载荷历史 (图 6) 的关系,可以识别从开裂的拉伸模式到开裂的剪切模式的转变,或者反之亦然。结果表明,当材料达到破坏状态时,RA 值呈指数增长。王哲伟<sup>[39]</sup> 通过对材料进行弯曲试验,发现加入钢纤维后,RA 值开始增加,AF (amplitude frequency) 值开始减小,此时破坏机制由基体开裂的拉伸型破坏向纤维拔出的剪切型破坏转变。

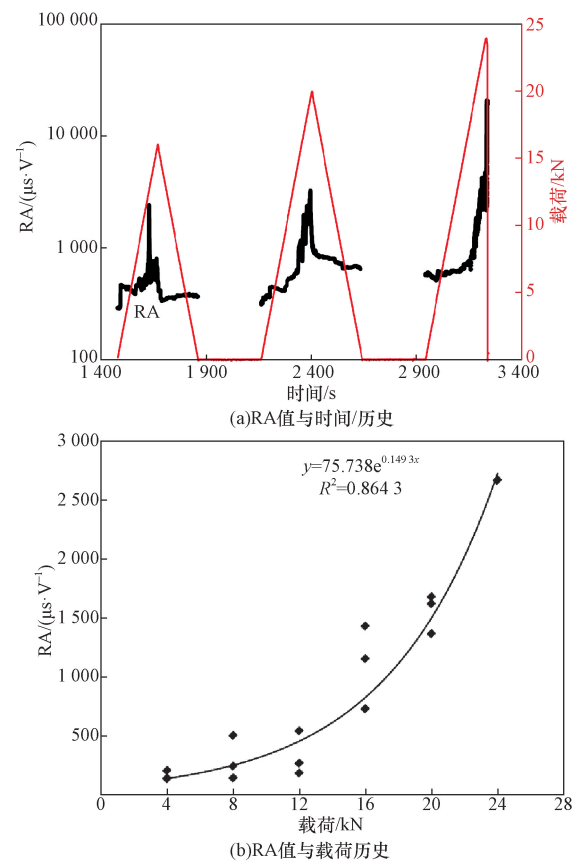


图 6 RA 值与时间/载荷历史<sup>[38]</sup>

Fig. 6 RA value versus time/load history<sup>[38]</sup>

### 3 声发射波形分析法

由于采集的声发射参数有限,且可能受到强噪声的影响,难以准确提取声发射源的损伤特征。波形分析可以去除信号中的噪声降低数据采集对环境的依赖,也可通过特征提取分析损伤模式。

#### 3.1 模态声发射分析

模态声发射(modal acoustic emission, MAE)是兰姆波理论研究板中声发射应力波的特点<sup>[40-41]</sup>,从而将声发射与特定的物理过程联系,本质上是一种声发射信号处理技术。对于工程上使用的板状结构,板厚远小于波长,声发射源在板中激励起扩展波、弯曲波和水平切变波3种模式的声波。MAE技术对声发射信号处理方法更加简单化。Martinez-Jequier等<sup>[42]</sup>提出了一种基于声发射信号中 $S_0$ 和 $A_0$  Lamb模式之间适当分离的算法以实时评估CFRP复合板分层过程。Rajic等<sup>[43]</sup>开发了一种新的声学传感功能,由耦合到高带宽解调仪的柔性高密度线性压电传感器阵列组成,并应用于板中声发射的原位波数-频率模态分解,证明它比使用单点压电接收器的传统多点定位技术更准确。Baker等<sup>[44]</sup>利用模态声发射和波形能量,结合峰值频率数据,研究了碳纤维增强环氧聚合物复合材料层合板裂纹的萌生和扩展。Jiang等<sup>[45]</sup>、孙贺等<sup>[46]</sup>采用模态声发射方法表征了碳纤维复合材料压力容器的损伤特性,利用提取的损伤模态特征和建立的MAE参数来确定复合材料压力容器的损伤模式。刘治东<sup>[47]</sup>利用对称位置相加法及滤波的方式将高速撞击信号中的 $S_0$ 、 $A_0$ 和 $S_2$ 模态进行分离。Michal等<sup>[48-49]</sup>通过分析分离的弯曲和拉伸兰姆波模态参数,为识别和随后表征或定位源自横向裂纹的信号提供了信息。文献<sup>[50-52]</sup>则认为高频 $S_0$ 模态包括基体开裂和纤维断裂,低频 $A_0$ 模态则包括分层损伤。目前纤维增强材料中损伤机制包括 $S_0$ 、 $A_0$ 模态,当某一频段同时存在两种模态传播时,无法通过单独使用滤波彻底分离,且频率还存在一定争议,需要进一步完善试验研究。

#### 3.2 傅里叶变换

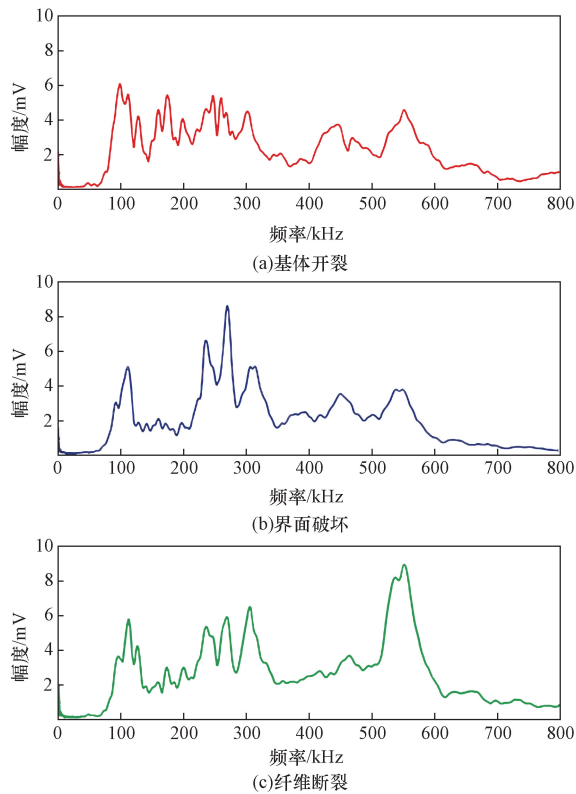
由于采集的声发射参数有限,且可能受到强噪声的影响,难以准确提取声发射源的损伤特征。波形分析可以去除信号中的噪声降低数据采集对环境的依赖,也可通过特征提取分析损伤模式。常用的方法有快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)、连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)、小波包变换(wavelet packet transform, WPT)

和 Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang transform, HHT)。

FFT是最早被广泛应用的波形分析方法之一,它可以将时域信号转换为频域信号然后提取频谱特征,根据FFT得到的峰值频率和振幅可以对损伤进行分类<sup>[53-54]</sup>。在去除噪声影响的基础上,还可以通过FFT得到与失效模式直接相关的主频率和幅值变化规律。然而,除非波形中只有一种损伤模式,否则由于波形信息被覆盖,单独的FFT分析可能会遗漏损伤模式。因此,有学者对波形进行分解,每一层包含一个特定的频率分量,确定其主频,然后利用FFT分析不同频带的能量率,确定损伤机理。为了确定试件中损伤机制的比例,应该使用WPT来分析不同频率范围内的能量分布<sup>[55]</sup>。FFT对冲击和断裂信号的频率特征提取并不敏感,而短时傅里叶变换可以通过时窗函数来解决这一问题<sup>[56]</sup>。STFT通过增加一个自由度将频域和时域连接起来,反映不同频率状态下的时间<sup>[57]</sup>。STFT分析是对代表各损伤机制主导频率内容的部分波形进行分析,可以在其他波形分析方法的基础上进一步详细分析各损伤的具体特征。

Arumugam等<sup>[58]</sup>利用傅里叶变化分别对2.5、3.5 mm/s两种不同冲击速度的冲击试验数据进行频谱变换,分析发现,频率分布从小到大对应分别是基体开裂(80~120 kHz),分层(120~170 kHz),纤维/基体界面脱黏(170~200 kHz),纤维断裂和纤维屈曲(200~300 kHz)。韩文钦等<sup>[59]</sup>、毛嘉伊等<sup>[60]</sup>分别采用不同的拉伸试验,对采集信号进行频谱变换,得到峰值频率有效反应试样损伤类型,发现时频结合有利于对数据进行全面分析。Arumugam等<sup>[61]</sup>利用声发射和快速傅里叶变换(FFT)分析研究了I型加载下玻璃/环氧复合材料试样的分层和损伤机制。从得到的结果可以区分纤维断裂和基体开裂的损伤机制。Woo等<sup>[62]</sup>基于节点 $b$ 值以上的高幅值事件率,根据主导频带及其幅度对信号类型进行了FFT分类,以识别试样的损伤模式。发现SEN(single-edge-notched)层合复合材料的主裂纹扩展对纤维取向比初始缺口方向更敏感。

图7为纤维增强复合材料3种基本细观损伤机制的典型频谱:纤维断裂、基体开裂和界面破坏。首先微裂发生在材料内部。Kempf等<sup>[63]</sup>重点研究准静态和动态载荷作用下玻璃和碳纤维增强复合材料的微观破坏机制。在力学测试过程中,通过声发射分析对不同纤维和基体组合的研究,可以揭示复合材料中纤维-基体相互作用的基本结构-性能关系。

图7 纤维增强复合材料典型频谱<sup>[63]</sup>Fig. 7 Typical spectrum of fiber-reinforced composite<sup>[63]</sup>

材料在不同的阶段会产生不同的损伤信号,多次损伤往往同时发生,导致信号重叠。HHT的时域和频域分辨率突出,具有较好的滤波能力,可以从波形中提取出更准确的声发射信息。Han等<sup>[64]</sup>将能量熵作为一种新的声发射描述符,在时域和频域度量信号复杂度,精确计算瞬时频率,提高损伤特征识别。Nazmdar等<sup>[65]</sup>利用HHT的相位角作为特征,从不同实验阶段的信号中提取损伤机理的频率范围。HHT在揭示隐藏数据方面比较有效,但其特征提取的准确性有待进一步研究,因此目前尚未得到广泛应用。

### 3.3 小波变换

波变换(wavelet transform, WT)技术由于其优越的信号处理能力在结构健康监测领域获得了突出的地位。由于其灵活的窗口大小和提取各种信号不连续点的特殊能力,小波变换在处理非平稳信号时特别有效,因为损伤机制往往表现出非线性特征。

20世纪90年代,小波分析法被引入声发射信号处理中。学者针对小波理论与应用进行了大量研究:王赫楠等<sup>[66]</sup>通过连续小波变换处理的太赫兹缺陷成像的图像,发现其对比度提升了1.3倍,识别出50  $\mu\text{m}$ 脱黏缺陷。高华等<sup>[67]</sup>基于小波变换进行

损伤信号的时频分析,发现损伤类型可通过信号特征以及频域特征有效识别。吴超群<sup>[68]</sup>对纤维复合材料运用小波神经网络与遗传算法进行识别,发现优化后的小波神经网络识别能力和泛化能力均有所提高。Pahuja等<sup>[69]</sup>采用力信号的小波包变换对CFRP切边过程进行监测。利用小波包变换(WPT)识别信号的关键特征。提出了一种利用小波变换对信号进行分解的新方法,该方法利用母小波对信号进行一定程度的分解。Saeedifar等<sup>[70]</sup>使用小波包变换(wavelet packet transform, WPT)计算每种损伤机制的百分比,与试样的力学数据、超声C扫描和数码相机图像一致。

## 4 模式识别分析法

模式识别(pattern recognition, PA)是对各种物质的或抽象的对象进行分类、描述和理解的过程。模式识别系统主要由以下过程组成:①对已知的样本进行特征参数的提取和分类;②找到合适的分类器;③对不同类型的样本数据进行识别和分类,具体操作过程如图8所示。模式识别方法需要从声发射撞击中提取相关的声发射特征(如振幅、能量、频率等),然后使用有监督的或无监督的分类方法创建一组表示特定损伤机制的AE特征<sup>[71-72]</sup>。

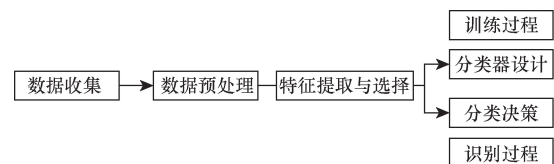


图8 声发射模式识别分析流程

Fig. 8 Analysis flow of acoustic emission mode identification

### 4.1 聚类分析

对声发射源进行定位和定性分析是对复合材料的声发射信号研究的重点,要识别出复合材料的损伤类型,首先需要对大量的复合材料声发射信号数据进行分类整理,并且构建出复合材料的声发射信号与其损伤模式之间的对应关系。根据最终结果是否可知可将模式识别技术分为无监督(unsupervised pattern recognition, UPR)和有监督(supervised pattern recognition, SPR)模式识别技术两类<sup>[73-74]</sup>。

聚类分析作为UPR技术中的一种重要方法,对于复合材料声发射信号的定性分析中得以广泛的运用。聚类分析的目的在于发现点、模式或者对象的分组情况,也存多种聚类算法,数据对象根据聚类算法被划分为几个大组,每组代表一个类别,算法具备以下特点:①每组至少有一个对象;②每个对象只存在一个组中。聚类算法可细分为硬划分算法与模糊划分算法,常见硬划分算法包括K-means

算法、*K*-mediod 算法、PAM (partitioning around mediods) 算法等, 常见模糊算法包括 FCM (fuzzy *C*-means) 算法<sup>[75-76]</sup> 等。Arthur 等<sup>[77]</sup> 通过声发射研究拉伸作用下的纤维增强材料的力学表征, 对采集到的声发射信号进行 *K*-means 聚类后得到三四类时间, 并且将得到的类别与观察的损伤机制进行了相关性分析。全面的损伤诊断通常分为 3 个层次: 损伤起始检测、损伤识别和损伤定位, 其中损伤识别需要需要聚类分析的支撑<sup>[78]</sup>。李英年<sup>[79]</sup> 通过建立遗传算法神经网络与 *K*-means 聚类结合分析方法, 对纤维复合材料层合板的各种失效模式进行了有效的识别。张亚楠等<sup>[80-81]</sup> 对纤维增强材料的拉伸损伤声发射信号进行采集, 并选用幅值和峰值频率对信号进行 *K*-means 聚类分析, 将信号分为 4 类: 基体开裂 (63.2 ~ 71.31 kHz)、纤维与基体剥离 (133.84 ~ 142.87 kHz)、分层和纤维断裂 (256.46 ~ 297.6 kHz)、纤维束断裂 (385.2 ~ 417.25 kHz); 赵文政等<sup>[82]</sup> 选用幅度、RA 值、峰值频率和质心频率特征参数并进行主成分分析降维, 对玻璃纤维复合材料在压缩载荷作用下的损伤声发射信号进行 *K*-means 聚类分析, 发现信号被分为 3 类, 分别对应基体开裂、纤维脱黏、分层与纤维断裂。栗丽<sup>[83]</sup> 通过 6 种聚类算法比较分析了纤维增强材料的拉伸试验中采集到的声发射信号, 判定标准采用 Davies-Bouldin 指标及 Silhouette 值, 开发出一套实用的聚类分析工具。Masmoudi 等<sup>[84]</sup> 采用 AE 技术持续监测疲劳加载的复合材料试件, 复合材料试件分为带有和不带有传感器。利用 *K*-means 聚类分类方法对声信号分析, 以识别损伤机制的差异, 并跟踪这两种复合材料的损伤机制的演化。结果表明存在 4 种损伤机制: 基体开裂 (A 类)、纤维-基体脱黏 (B 类)、纤维断裂 (C 类) 和分层 (D 类), 如图 9 所示。*K* 均值算法和模糊 *C* 均值算法在纤维增强复合材料的声发射信号分离以及分类中扮演着重要的角色, 准确率超过 85%<sup>[85-86]</sup>。综上所述, 聚类分析是一种分析多参数声发射信号的有效方法。

## 4.2 支持向量机

支持向量机 (support vector machine, SVM) 利用监督学习对未分类数据进行二元分类, 决策边界是对学习样本求解的最大边距超平面。克服了人工神经网络抗噪能力差、网络稳定性低的缺点, 对于识别小样本、非线性和高维模式具有优势, 广泛应用模式识别、回归分析等领域<sup>[87]</sup>。张璐莹等<sup>[88]</sup>、李伟等<sup>[89]</sup> 利用经验模态分解 (empirical mode decomposition, EDM) 和主成分分析 (principal component analysis, PCA) 提取并处理声发射信号特征, 再结合

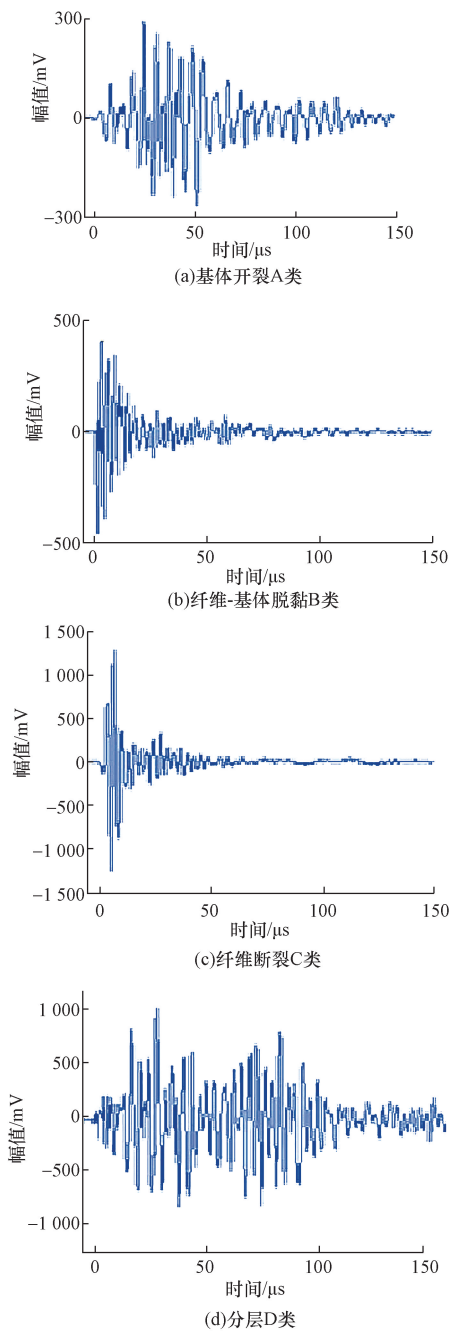


图 9 4 种损伤机制波形图<sup>[84]</sup>

Fig. 9 Waveform of four damage mechanisms<sup>[84]</sup>

SVM 技术进行 CFRP 损伤模式识别, 最终准确识别了基体开裂和纤维断裂两种损伤模式。Ding 等<sup>[90]</sup> 利用不同模式识别方法对碳/环氧树脂拉伸试验声发射信号源分类问题进行研究, 结果表明, SVM 网络相较于 BP 神经网络 (back propagation neural network) 具有更高的分类准确性。Oh 等<sup>[91]</sup> 通过离散小波变换从 PVDF (poly vinylidene fluoride) 信号中提取与 CFRP 冲击失效机理相关的信号特征, 并采用 SVM 对冲击损伤类型进行分类, 其分类准确度高达 92.3%。

## 5 机器学习和深度学习

机器学习和深度学习在计算机视觉、语言处理等领域发挥着重要作用。声发射信号中提取的特征可以作为模型的输入,也可以通过小波变换等生成的二维图像作为输入模型。深度学习与机器学习中的神经网络密切相关,深度的人工神经网络(artificial neural network, ANN)是深度学习的算法和手段。由于声发射信号的信息丰富,许多传统和现有的算法可能会被包括噪声在内的各种信号源数据的干扰,利用机器学习算法将复合材料的力学性能与多个声发射特征联系起来,避免了单个声发射特征的可解释性受限。利用机器学习研究声发射特征参数和波形图可以帮助研究人员更好地了解损伤特征。王银玲等<sup>[92]</sup>利用遗传算法对 BP 神经网络进行优化,降低了网络过拟合现象,有效缩短了训练时间,并成功识别了 CFRP 拉伸过程中基体开裂、界面脱黏、基体断裂和纤维断裂 4 种损伤模式。Louis 等<sup>[93]</sup>发现在 SiCf-SiCm 复合材料管的剩余使用寿命预测上,深度卷积神经网络的预测结果相比随机森林更准确,但在性能退化后期后者预测效果更好。Sathiyamurthy 等<sup>[94]</sup>尝试利用剪切试验中记录的声发射参数,利用神经网络预测不同表面粗糙度的 CFRP 复合材料试样的黏结强度。设计并训练了监督学习型人工神经网络,利用声发射数据预测失效负荷,发现神经网络与声发射监测相结合,可作为 CFRP 复合材料结构实时健康监测的有效工具。Nasiri 等<sup>[95-96]</sup>训练了一个基于深度学习的端到端 CNN 模型,用于使用 AE 数据作为原始输入来在线监测复合材料管的损伤过程,同时对比了随机森林(random forest, RF)应用于损坏阶段预测。结果表明,端到端 CNN 模型平均结果优于 RF

模型,且用 CNN 的卷积层从声发射中提取高级特征和使用人工挑选的特征相比,在复合材料的声发射分类中更具有优势。Moradi 等<sup>[97]</sup>提出一种半监督深度神经网络,通过结构健康监测(structural health monitoring, SHM)数据融合构成健康指标,采用声发射法对复合板疲劳载荷进行监测,并利用提取的特征构建智能健康指标。Xu 等<sup>[98]</sup>用基于改进的梅尔频率倒谱分析和统计方法,将声发射特征参数与端部缺口弯曲(end notched flexure, ENF)复合材料层合板的力学行为联系起来,建立了一种新的定量模型。Claudia 等<sup>[99]</sup>利用 CFRP 复合材料不同损伤模式的声发射波形训练 CNN 进行损伤在线监测,得到基体开裂、分层、脱黏和纤维断裂 4 种不同损伤模式的声发射波形的 Mel 尺度谱图,作为 CNN 的训练数据和测试数据,结果发现了 CNN 的整体预测准确率为 97.9%,其中纤维断裂和分层事件的预测准确率为 100%,从而验证了 CNN 的损伤分类准确性。郭福平<sup>[100]</sup>发现时间序列数据的端到端深度学习模型分类比二维图像为输入深度学习模型分类准确率高,以声发射时间序列数据为输入,有效识别了 CFRP 复合材料损伤类型,验证了模型的泛化能力,如图 10 所示。利用连续小波变换的二维图像作为卷积神经网络的输入,实现了对高温损伤的高准确率识别。孙平<sup>[101]</sup>在 50% 断裂载荷采集声发射信号,利用神经网络预测该试件的最终断裂载荷,预测误差在 5% 以内。上述研究可以证明深度的人工神经网络(ANN)已经广泛应用于声发射在 FRP 中的应用,能够实现模式识别与信号处理,损伤检测与定位,实时智能识别,优化网络结构和损失函数,多参数分析,总的来说,深度学习神经网络在声发射研究中展现了其强大的数据处理能力和模式识别

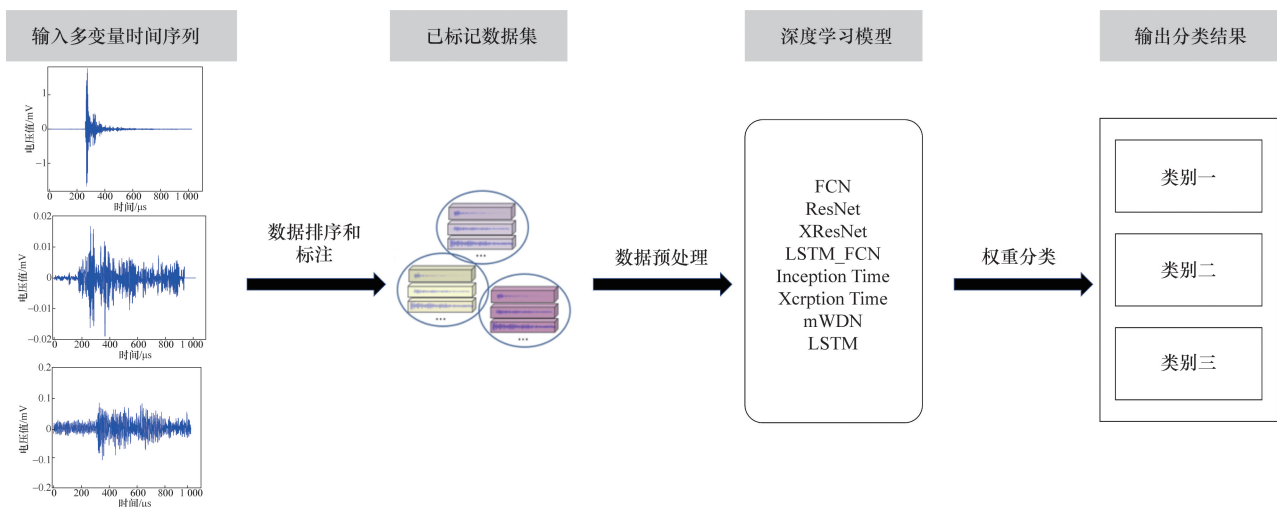


图 10 CFRP 复合材料典型损伤数据的深度学习基本流程<sup>[100]</sup>

Fig. 10 Basic flow of deep learning for typical damage data of CFRP composites<sup>[100]</sup>

能力,它不仅能够提高信号处理的精度,还能实现损伤的实时监测和预警,对于促进声发射技术在FRP监测的发展和具有重大意义。随着深度学习技术的高速发展,未来在声发射领域可能会有更多创新应用出现。

## 6 结论与展望

随着工业化的发展,FRP复合材料在各种领域得到广泛发展,然而恶劣的服役环境和多变的载荷给FRP服役带来了挑战,因此亟须结构健康监测技术的发展。声发射技术能够实时监控和评估运行中的复合材料结构,对于维护FRP材料健康状况、预防突发性故障具有巨大的发展潜力,本文中通过总结声发射技术在FRP领域中的应用,发现声发射具有以下技术特点。

(1)讨论了峰值幅度和峰值频率单独使用会存在相应的误差。讨论了高振幅/高频率信号与纤维断裂相关的原因,并讨论了高振幅/高频率信号为何也能指示层间裂纹扩展。此外,还讨论了通过RA值利用峰值振幅随时间上升的有效方法。声发射参数在FRP检测过程中存在衰减与重叠现象,可以采用信号还原方法对信号进行还原,讨论了单参数使用过程中会存在相应的误差,可以采用多参数结合以及采用新的参数分析法,来提高各个参数的准确性。

(2)对现有主流波形分析方法进行了对比介绍,波形分析可以去除信号中的噪声降低数据采集对环境的依赖,也可通过特征提取分析损伤模式。适合处理数据量大的声发射信号。多尺度细化分析波形,通过伸缩和平移等运算实现信号的局部变换,可以有效降低噪声信号的干扰,对于真实信号提取分类具有重要意义。

(3)可以通过使用多个参数并通过监督/无监督模式识别技术对声发射信号进行聚类来消除使用单个参数的误差,讨论了可用的和流行的模式识别技术的数量。

(4)采用高级数据分析技术(如机器学习和深度学习)结合声发射数据,可以预测损伤发展,做到科学决策。还可以实现损伤的实时监测和预警,对FRP监测的发展与应用具有重大意义。

随着信号处理和人工智能的不断进步,声发射技术在FRP材料监测领域呈现出新的发展趋势:

(1)随着人工智能和机器学习技术的发展,声发射数据的处理和分析可能会更加智能化和自动化,从而提高检测的效率和准确性。

(2)由于FRP与金属材料的特性不同,其声发射

产生机制和波传播规律也不同。因此,FRP材料的声发射检测需要特定的方法,如存储完整波形、使用特定传感器和传感器阵列、设定特定阈值、选择合适的加载模式以及改进的数据分析技术。这些方法的发展和完善将是未来的一个重要研究方向。

(3)声发射技术对于复合材料的监测的未来发展可能会涉及更多跨学科的研究,结合材料科学、机械工程、数据分析和计算机科学等领域的知识,以实现更全面的监测和分析。

(4)为了提高声发射技术的可靠性和比较性,未来可能会有更多的标准化和规范化工作,包括测试方法、数据处理和结果解释等方面。

## 参 考 文 献

- [1] 徐栋. 基于声发射多特征统计分析的纤维增强复合材料损伤分类与性能预测[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
Xu Dong. Damage classification and performance prediction of fiber-reinforced composite materials based on acoustic emission multi-feature statistical analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [2] Lima T P L, Canelas C A A, Concha V O C, et al. 3D bioprinting technology and hydrogels used in the process[J]. Journal of Functional Biomaterials, 2022, 13(4): 1-18.
- [3] Mesquita P, Gong L, Lin Y. A low-cost microfluidic method for microplastics identification: towards continuous recognition[J]. Micromachines, 2022, 13(4): 499.
- [4] Chandgude S, Salunkhe S. In state of art: mechanical behavior of natural fiber-based hybrid polymeric composites for application of automobile components[J]. Polymer Composites, 2021, 42(6): 2678-2703.
- [5] Choudhary S, Haloi J, Sain M K, et al. Systematic literature review on thermal and acoustic characteristics of natural fibre polymer composites for automobile applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 2: 2214-7853.
- [6] Bi H S, Miao J X, Sun Z F, et al. Research on pitting corrosion characteristics of X90 steel based on acoustic emission and electrochemistry methods[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(11): 105243.
- [7] Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(1): 50-57.
- [8] Rajak D K, Pagar D D, Menezes P L, et al. Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications[J]. Polymers, 2019, 11(10): 1667.
- [9] 银磊, 张新宇, 赵金辉, 等. 基于声发射信号特征的海上风电场导管架裂纹检测系统[J]. 中国新通信, 2023, 25(14): 39-41.  
Yin Lei, Zhang Xinyu, Zhao Jinhui, et al. Jacket crack detection system for offshore wind farm based on acoustic emission signal characteristics[J]. China New Telecommunications, 2023, 25(14): 39-41.
- [10] Kaiser J H. On the occurrence of noises during the melting and solidification of metals[J]. Research in the Field of Engineering, 1985, 23(7): 38-42.

- [11] Dahmene F, Yaacoubi S, Mountassir M E. Acoustic emission of composites structures: story, success, and challenges[J]. *Physics Procedia*, 2015, 70: 599-603.
- [12] Tian Y, Yu R, Zhang Y. Application of felicity effect in crack stress identification and quantitative damage assessment of limestone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 2907-2913.
- [13] 沙云东, 陈兴武, 栾孝驰, 等. 基于小波包分解-峭度值指标-希尔伯特包络解调融合方法处理声发射信号的滚动轴承故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9315-9323.  
Sha Yundong, Chen Xingwu, Luan Xiaochi, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on acoustic emission signal analysis by WPD-KI-HED combination method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9315-9323.
- [14] 孟超. 碳纤维复合材料声发射检测技术研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2017.  
Meng Chao. Research on testing technology of carbon fiber composites based on acoustic emission[D]. Deyang: Civil Aviation Flight University of China, 2017.
- [15] 刘颖红林. 纤维增强复合材料损伤演化声发射量化表征方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.  
Liu Yinghonglin. quantitative acoustic emission characterisation of damage evolution in fiber-reinforced composites[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [16] 张倩. 碳/玻璃纤维增强复合材料拉挤杆疲劳损伤演化机理及寿命预测研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.  
Zhang Qian. Research on fatigue damage mechanism and life prediction of pultruded carbon/glass-fibre reinforced composite rod [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [17] Michał S, Szymon D, Paweł Z, et al. Damage characterisation of GFRP composites based on clustering acoustic emission events utilizing single-failure-cause tests as reference[J]. *Composite Structures*, 2025, 351: 118596.
- [18] Jung D, Lee B S, Yu W R, et al. Effect of propagation distance on acoustic emission of carbon fiber/epoxy composites[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(6): 3342-3353.
- [19] Jung D, Yu W R, Na W. Investigation of Ib-values for determining fracture modes in fiber-reinforced composite materials by acoustic emission[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(13): 3641.
- [20] 刘朔. 双胶粘剂修复复合材料结构脱粘变形损伤的声发射行为[D]. 保定: 河北大学, 2023.  
Liu Shuo. Acoustic emission behavior of debonded deformation damage in composite structures repaired by bi-adhesive repair [D]. Baoding: Hebei University, 2023.
- [21] Ativitavas N, Fowler T, Pothisiri T. Acoustic emission characteristics of pultruded fiber reinforced plastics under uniaxial tensile stress[C]// *Proceeding of European Conference on Acoustic Emission Testing*. Berlin: European Working Group on Acoustic Emission, 2024, 2: 447-454.
- [22] Liu P F, Chu J K, Liu Y L, et al. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission[J]. *Mater Design*, 2012, 37: 228-235.
- [23] Xu D, Liu P F, Li J G, et al. Damage mode identification of adhesive composite joints under hygrothermal environment using acoustic emission and machine learning[J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 351-363.
- [24] Liu Y H, Peng J, Li W, et al. Predicting the delamination mechanisms of multidirectional laminates using the energy release rate obtained from AE monitoring[J]. *Materials Evaluation*, 2022, 80(1): 34-47.
- [25] Li L, 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.
- [26] Habibi M, Lebrun G, Laperrière L. Experimental characterization of short flax fiber mat composites: tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(11): 6567-6580.
- [27] Gutkin R, Green C J, Vangrattanacha S, et al. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(4): 1393-1407.
- [28] Liu Y H, Zhang L, Li Z X, et al. Investigation on damage evolution of open-hole plain woven composites under tensile load by acoustic emission signal analysis[J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116481.
- [29] 应晶华. 基于声发射的碳纤维复合材料层间加强和损伤预测研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.  
Ying Jinghua. Research on interlayer strengthening and damage prediction of CFRP based on acoustic emission[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.
- [30] 丁瀛. 基于声发射技术的树脂基复合材料损伤状态监测[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.  
Ding Ying. Damage monitoring of resin matrix composites based on acoustic emission[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [31] Harris D O, Bell R L. The measurement and significance of energy in acoustic-emission testing[J]. *Experimental Mechanics*, 1977, 17: 347-353.
- [32] Baker C, Morscher G N, Pujar V V, et al. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: modal acoustic emission and peak frequency analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 116: 26-32.
- [33] Oskoueï A R, Zucchelli A, Ahmadi M, et al. An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1444-1455.
- [34] Xu D, Liu P F, Chen Z P, et al. Achieving robust damage mode identification of adhesive composite joints for wind turbine blade using acoustic emission and machine learning[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111840.
- [35] Saeedifar M, Fotouhi M, Najafabadi M A, et al. Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85: 113-122.
- [36] 徐晓阳, 苏怀智, 闫潇群, 等. 基于声发射信号能量衰减的混凝土材料损伤检测[J]. *无损检测*, 2023, 45(8): 46-51.  
Xu Xiaoyang, Su Huaizhi, Yan Xiaoqun, et al. Damage detection of concrete materials based on energy attenuation of acoustic emission signal[J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(8): 46-51.
- [37] Barile C, Kannan V P, Pappalettera G, et al. Advanced acoustic

- emission signal processing techniques for structural health monitoring[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2024, 54: 225-232.
- [38] Aggelis D J, Barkoula N M, Matikas T E, et al. Acoustic structural health monitoring of composite materials: damage identification and evaluation in cross ply laminates using acoustic emission and ultrasonics[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72: 1127-1133.
- [39] 王哲伟. 定向碳纤维增强地质聚合物的力学性能及弯曲破坏过程的声发射特性研究[D]. 温州: 温州大学, 2021.  
Wang Zhewei. Study on mechanical properties of aligned steel fiber reinforced geopolymer and acoustic emission characteristics during bending failure[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [40] Liu Y. Research progress of acoustic emission detection technology based on modal theory[J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2021, 21(4): 853-864.
- [41] Guo F, Li W, Jiang P, et al. Deep learning approach for damage classification based on acoustic emission data in composite materials[J]. *Materials*, 2022, 15(12): 4270.
- [42] Martinez-Jequier J, Gallego A, Suarez E, et al. Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2015, 68: 317-326.
- [43] Rajic N, Rosalie C, Vien B S, et al. *In situ* wavenumber-frequency modal decomposition of acoustic emissions[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(6): 2033-2050.
- [44] Baker C, Morscher G N, Pujar V V, et al. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 116: 26-32.
- [45] Jiang P, Liu X, Li W, et al. Damage characterization of carbon fiber composite pressure vessels based on modal acoustic emission[J]. *Materials*, 2022, 15(14): 4783.
- [46] 孙贺, 李伟, 张璐莹, 等. 基于模态声发射的碳纤维复合材料损伤研究[J]. *中国测试*, 2021, 47(5): 16-23.  
Sun He, Li Wei, Zhang Luying, et al. Research on damage of carbon fiber composites based on modal acoustic emission[J]. *China Measurement & Test*, 2021, 47(5): 16-23.
- [47] 刘治东. 空间碎片超高速撞击载人密封舱在轨感知技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Liu Zhidong. Onboard monitoring technique for detection of impact on manned pressurized cabin by space debris[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [48] Michal S, Pavel S, Martin F, et al. Adaptive approach methodology of the lb-value estimator calculation for acoustic emission analysis of carbon fibre reinforced plastics[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 149: 107264.
- [49] Michal S, Jakub C, Pavel S, et al. Transverse cracking signal characterization in CFRP laminates using modal acoustic emission and digital image correlation techniques[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 255: 110697.
- [50] Martínez-Jequier J, Gallego A, Suárez E, et al. Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis[J]. *Composites; Part B*, 2015, 68: 317-326.
- [51] Yaacoubi S, Dahmene F, Bouzenad A, et al. Modal acoustic emission for composite structures health monitoring: issues to save computing time and algorithmic implementation[J]. *Composite Structures*, 2018, 183: 338-346.
- [52] 张璐莹. 碳纤维复合材料损伤模态识别方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.  
Zhang Luying. Research on damage pattern recognition method of carbon fiber composites[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [53] Ramamanohara Babu M, Bhanu Prakash T V. Characterisation of fiber failure mode in T-700 carbon fiber reinforced epoxy composites by acoustic emission testing[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, 50(1): 45-57.
- [54] 白林, 郭科, 刘斌. 快速傅里叶变换在地球化学数据降噪中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(26): 124-127.  
Bai Lin, Guo Ke, Liu Bin. Application of fast fourier transform in the geochemical data denoising[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(26): 124-127.
- [55] Dastjerdi P B, Ahmadi M. Characterizing the damage mechanisms in mode II delamination in glass/epoxy composite using acoustic emission[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2018, 67(5): 545-553.
- [56] Fotouhi M, Saeedifar M, Sadeghi S, et al. Investigation of the damage mechanisms for mode I delamination growth in foam core sandwich composites using acoustic emission[J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(3): 265-280.
- [57] Baccar D, Söffker D. Identification and classification of failure modes in laminated composites by using a multivariate statistical analysis of wavelet coefficients[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 96: 77-87.
- [58] Arumugam V, Sidharth A A P, Santulli C. Failure modes characterization of impacted carbon fibre reinforced plastics laminates under compression loading using acoustic emission[J]. *Composite Materials*, 2014, 48(28): 3457-3468.
- [59] 韩文钦, 顾爱军. 碳纤维复合材料损伤识别的 AE 频响分析方法[J]. *淮阴工学院学报*, 2016, 25(1): 67-71.  
Han Wenqin, Gu Aijun. Damage modes recognition of CFRP laminates based on acoustic emission technique[J]. *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 2016, 25(1): 67-71.
- [60] 毛嘉伊, 陈雪莹, 陈敦焯, 等. 碳纤维复合材料损伤声发射的时频分析[J]. *海峡科技与产业*, 2019(7): 88-91.  
Mao Jiayi, Chen Xueying, Chen Dunchun, et al. Time-frequency analysis of damage acoustic emission of carbon fiber reinforced polymer[J]. *Technology and Industry Across the Straits*, 2019(7): 88-91.
- [61] Arumugam V, Suresh Kumar C, Santulli C, et al. A global method for the identification of failure modes in fiberglass using acoustic emission[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2011, 39(5): 954-966.
- [62] Woo S C, Choi N S. Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67: 1451-1458.
- [63] Kempf M, Skrabala O, Altstädt V. Acoustic emission analysis for characterisation of damage mechanisms in fibre reinforced thermosetting polyurethane and epoxy[J]. *Composites Part B; Engineering*, 2014, 56: 477-483.
- [64] Han W, Luo Y, Gu A J, et al. Damage modes recognition and

- Hilbert-Huang transform analyses of CFRP laminates utilizing acoustic emission technique [J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 23(2): 155-178.
- [65] Nazmdar S M, Yousefi J, Fotouhi M, et al. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform [J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 50(14): 1897-1907.
- [66] 王赫楠, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于连续小波变换的玻璃纤维增强树脂复合材料太赫兹特征增强及缺陷成像 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4190-4197.  
Wang Henan, Ren Jiaojiao, Zhang Dandan, et al. Glass fiber reinforced polymer terahertz feature enhancement and defect imaging based on continuous wavelet transform [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(12): 4190-4197.
- [67] 高华, 熊超, 殷军辉, 等. 碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤及声发射特征分析 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(12): 107-111.  
Gao Hua, Xiong Chao, Yin Junhui, et al. Analysis of internal compressive damage and acoustic emission characteristics of carbon fiber composite laminates [J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(12): 107-111.
- [68] 吴超群. 基于小波神经网络的复合材料损伤声发射信号识别方法研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.  
Wu Chaoqun. Research on recognition method of acoustic emission signals from composite material damage based on wavelet neural network [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [69] Pahuja R, Ramulu Mamidala. Quality monitoring in milling of unidirectional CFRP through wavelet packet transform of force signals [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 48: 388-399.
- [70] Saeedifar M, Najafabadi M A, Zarouchas D, et al. Barely visible impact damage assessment in laminated composites using acoustic emission [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 152: 180-192.
- [71] Karimi N Z, Minak G, Kianfar P. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission [J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 107-114.
- [72] Jequier J M, Gallego A, Elisabet S, et al. Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis [J]. *Composites; Part B*, 2015, 68: 317-326.
- [73] 乔帅. 基于声发射波形分析和机器学习的复合材料损伤模式识别 [D]. 保定: 河北大学, 2023.  
Qiao Shuai. Acoustic emission waveform analysis and machine learning based damage pattern recognition of composites [D]. Baoding: Hebei University, 2023.
- [74] Zhou W, Pan Z B, Wang J. et al. Review on acoustic emission source location, damage recognition and lifetime prediction of fiber-reinforced composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58: 583-607.
- [75] 张勇. 基于负压波的天然气管道泄漏检测识别方法研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.  
Zhang Yong. Study on leak detection and identification method of natural gas pipeline based on negative pressure wave [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [76] 宋宗香. 模糊 C-均值聚类在股票投资中的应用 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.  
Song Zongxiang. The application of fuzzy C-means clustering in the stock investment [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [77] Arthur M, Abderrahim E M, Zouhaier J, et al. Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fiber reinforced composite by acoustic emission [J]. *Composites Part A*, 2016, 90: 100-110.
- [78] Saeedifar M, Zarouchas D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: a review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 195: 108039.
- [79] 李英年. T700 碳纤维复合材料渐进损伤声发射特性分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
Li Yingnian. The study on T700 carbon fiber composite material progressive damage acoustic emission characteristics [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [80] 张亚楠, 周勃, 俞方艾, 等. 含缺陷风电叶片复合材料的失稳状态识别和预测 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 318-325.  
Zhang Yanan, Zhou Bo, Yu Fangai, et al. Identification and prediction of instability status of composites with defective wind power blades [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(9): 318-325.
- [81] 张亚楠, 周勃, 俞方艾, 等. 基于聚类分析的含原生缺陷风力机叶片拉伸缺陷演化研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 396-402.  
Zhang Yanan, Zhou Bo, Yu Fangai, et al. Study on the evolution of tensile defects of wind turbine blades with primary defects based on cluster analysis [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(4): 396-402.
- [82] 赵文政, 李敏, 张燕南, 等. 复合材料损伤过程声发射信号聚类分析与压缩变形测量 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(6): 5-10.  
Zhao Wenzheng, Li Min, Zhang Yannan, et al. Research on large diameter hole drilling method of the carbon fiber reinforced plastics [J]. *Composites Science and Engineering*, 2018(6): 5-10.
- [83] 栗丽. 基于声发射信号分析的 2D 及 3D 纺织结构复合材料损伤机制研究 [D]. 上海: 东华大学, 2015.  
Su Li. Investigations on damage mechanisms of 2D and 3D fabric composites based on acoustic emission signal analysis [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [84] Masmoudi S, Abderrahim E M, Saïd T. Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of e-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant [J]. *Applied Acoustics*, 2016, 108: 50-58.
- [85] Al-Jumaili S K, Holford K M, Eaton M, et al. Classification of acoustic emission data from buckling test of carbon fibre panel using unsupervised clustering techniques [J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(3): 241-251.
- [86] Barile C, Pappalettera G, Kannan V P, et al. A neural network framework for validating information-theoretic parameters in the applications of acoustic emission technique for mechanical characterization of materials [J]. *Materials*, 2023, 16(1): 300.
- [87] 孙小权, 邹丽英. 基于 SVM 的图像识别在零件分拣系统中的应用 [J]. *机电工程*, 2018, 35(12): 1353-1356.  
Sun Xiaoquan, Zou Liying. Application of image recognition based on SVM in part sorting system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(12): 1353-1356.
- [88] 张璐莹, 李伟, 姜智通, 等. 基于主成分分析与 SVM 的碳纤维复合材料损伤声发射信号模式识别 [J]. *压力容器*, 2020,

- 37(7): 59-68.
- Zhang Luying, Li Wei, Jiang Zhitong, et al. Characteristic analysis of acoustic emission signals of bend damage process of carbon fiber composites based on principal component analysis and SVM [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2020, 37(7): 59-68.
- [89] 李伟, 姜智通, 张璐莹, 等. 碳纤维复合材料损伤声发射信号模式识别方法[J]. *中国测试*, 2020, 46(6): 121-128.
- Li Wei, Jiang Zhitong, Zhang Luying, et al. Pattern identification method for acoustic emission signals of amage in carbon fiber reinforced polymer[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(6): 121-128.
- [90] Ding P, Li Q, Huang X. Classification of acoustic emission sources produced by carbon/epoxy composite based on support vector machine[J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, 87(1): 012002.
- [91] Oh H T, Won J I, Woo S C, et al. Determination of impact damage in CFRP via PVDF signal analysis with support vector machine [J]. *Materials*, 2020, 13(22): 5207.
- [92] 王银玲, 李华聪. 遗传算法优化的碳纤维复合材料声发射数据聚类分析[J]. *无损检测*, 2019, 41(6): 1-5.
- Wang Yinling, Li Huacong. Clustering analysis of acoustic emission data of carbon fiber composites optimized by genetic algorithm [J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(6): 1-5.
- [93] Louis S M. , Nasiri A, Bao J J, et al. Remaining useful strength (RUS) prediction of SiCf-SiCm composite materials using deep learning and acoustic emission[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2680.
- [94] Sathiyamurthy R, Draiselvam M, Sevel P. Acoustic emission based deep learning technique to predict adhesive bond strength of laser processed CFRP composites[J]. *FME Transactions*, 2020, 48(3): 611-619.
- [95] Nasiri A, Bao J J, McCleary D, et al. Online damage monitoring of SiCf-SiCm composite materials using acoustic emission and deep learning[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 140534- 140541.
- [96] Nasiri A. Deep learning based sound event detection and classification[D]. Columbia: University of South Carolina, 2021.
- [97] Moradi M, Broer A, Chiachio J, et al. Intelligent health indicator construction for prognostics of composite structures utilizing a semi-supervised deep neural network and SHM data [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117: 105502.
- [98] Xu D, Liu P, Chen Z, et al. A new quantitative acoustic emission model for damage characterization of composite laminates using original waveforms[J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2022, 21(5): 2276-2290.
- [99] Claudia B, Caterina C, Giovanni P, et al. Damage monitoring of carbon fibre reinforced polymer composites using acoustic emission technique and deep learning [J]. *Composite Structures*, 2022, 292(4): 115629.
- [100] 郭福平. 基于深度学习的 CFRP 复合材料损伤声发射信号模式识别[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- Guo Fuping. Pattern recognition of acoustic emission signals based on deep learning for CFRP composite damage [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [101] 孙平. 高温环境下碳纤维复合材料拉伸损伤声发射特性研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- Sun Ping. Research on acoustic emission characteristics of tensile damage of carbon fiber composites at high temperature [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.