

DOI:10.11784/tdxbz202412015

使用嵌入式 PZT 传感器对 CFRP 螺栓连接结构 疲劳失效过程监测研究

李 皓¹, 崔宇轩¹, 康家宝², 吕 玮¹, 李士鹏¹, 傅国宇¹

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 螺栓连接作为碳纤维增强复合材料(CFRP)结构中常见的连接方式, 其疲劳损伤过程复杂、失效突发性强, 因此对其进行结构健康监测具有重要意义. 针对传统传感方法存在布设复杂、操作不便等问题, 本文提出一种基于嵌入式 PZT 传感器的监测技术, 研究了疲劳加载过程中 CFRP 螺栓连接结构的损伤识别机制. 通过断铅试验与频谱响应验证了优化嵌入工艺的有效性, PZT 传感器存活率由传统方法的 40% 提高至 80%. 基于 Hilbert-Huang 变换(HHT)对 PZT 信号进行时频分析, 识别出 10 Hz 频率分量在初始损伤阶段的显著突变特征. 对比 AE 信号与 SEM 微观损伤形貌, 验证了 PZT 信号与界面脱黏、微裂纹扩展等微损伤机制之间的对应关系. 定量分析了加载频率与 PZT 信号中不同频率分量之间的响应相关性, 指出加载频率主导的分量在疲劳过程中的演化趋势最能反映结构内部的损伤演进, 其皮尔逊相关系数高达 0.82. 结果表明: PZT 信号在损伤 3 阶段中均具有良好的识别能力, 特别是在早期微裂纹萌生阶段的响应敏感性高, 可实现结构状态的实时预警与演化识别. 本文研究成果为嵌入式智能传感技术在复合材料结构健康监测中的应用提供了理论依据与工程参考.

关键词: 碳纤维增强复合材料螺栓连接; 压电陶瓷传感器; 疲劳失效监测; 结构健康监测

中图分类号: V214.8

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)04-0343-11

Embedded PZT Sensor-Based Fatigue Failure Monitoring in CFRP Bolted Connections

Li Hao¹, Cui Yuxuan¹, Kang Jiabao², Lü Wei¹, Li Shipeng¹, Fu Guoyu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Bolted connections, a conventional method for joining carbon fiber reinforced polymer(CFRP) composite structures, undergo complex fatigue failure processes, which expose them to intense, unexpected failures. Therefore, monitoring their structural health is greatly significant. To address the challenges of complex deployment and unsuitable operation in traditional sensing methods, a monitoring technology is proposed based on embedded lead zirconate titanate(PZT) sensors after which the damage identification mechanism for CFRP bolted structures during fatigue loading is investigated. Next, the effectiveness of the optimized embedding process is verified via lead breakage experiments and spectral responses, revealing that this process increased the survival rate of the PZT sensor from 40% (obtained by conventional processes) to 80%. Additionally, the time-frequency analysis of the PZT signals based on the Hilbert-Huang transform(HHT) reveals the significant mutation characteristics of the 10 Hz frequency component in the initial damage stage. Subsequently, the correlations between the PZT signal and microdamage mechanisms, such as interface debonding and microcrack extension, are verified by comparing the acoustic emission signal with the scanning electron microscopy microdamage morphology. Furthermore, the response correlation between

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-05-07.

作者简介: 李 皓(1989—), 男, 博士, 副教授, haolitju@tju.edu.cn.

通信作者: 傅国宇, guoyu07@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375461, 52075380, 52275459); 中国博士后科学基金-天津联合资助项目(2023T016T).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52375461, No. 52075380, No. 52275459), the China Postdoctoral Science Foundation-Tianjin Joint Support Program(No. 2023T016T).

the loading frequency and different frequency components of the PZT signal is quantitatively analyzed, revealing that the evolution trend of the loading frequency-dominated component during fatigue best reflects the damage evolution within the structure, with a very high Pearson correlation coefficient (0.82). The results indicate that the PZT signal can effectively identify three damage stages with high sensitivity, especially the onset of the microcrack germination stage, which can facilitate real-time early warning of the structural health of CFRP bolt joints. Overall, the results offer a theoretical basis and an engineering reference for applying embedded intelligent sensing technologies to the monitoring of the health of composite structures.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP) bolted joint; piezoelectric ceramic sensor; fatigue failure monitoring; structural health monitoring

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有高比强度、高模量、优异的抗疲劳性和设计灵活性,因此被广泛应用于航空航天、汽车、能源等领域^[1-2]。螺栓连接是 CFRP 复合材料最常用的连接方法之一,在使用过程中,螺栓连接处的应力集中使其很容易出现纤维断裂和分层等内部损伤,这些损伤会不断发展,最终导致灾难性的结构失效,对设备性能产生不利影响^[3]。因此,对 CFRP 螺栓连接结构进行实时监测对于确保设备的可靠性至关重要。

目前 CFRP 的结构健康监测(structure health monitoring, SHM)技术主要采用超声波^[4]、射线^[5]和光学^[6]监测方法。超声波监测具有传播距离远、可利用传感器网络进行在线实时监测等优点^[7],例如 Rheinforth 等^[8]采用空气耦合 Lamb 波监测纤维增强复合材料在各种疲劳加载条件下的疲劳破坏状态,并研究了裂纹密度与刚度退化之间的相关性。X 射线成像是最常用的无损检测方法之一。Wagner 等^[9]利用 CT 扫描和在线刚度监测技术开发了一种在拉伸疲劳载荷下自动检测 CFRP 损伤大小的算法。光纤传感技术具有体积小、灵敏度高、易于复合等优点。Fazzi 等^[10]将基于弱倾斜光纤布拉格光栅(tilted fiber Bragg grating, TFBG)的双参数传感器嵌入 1 mm 厚的玻璃纤维增强聚合物(glass fiber reinforced polymer, GFRP)层板中,独立测量热加载下的温度和应变变化,结果表明,与温度补偿 TFBG 获得的应变值相比,双参数传感器的平均误差略低于 5%,补偿 TFBG 的平均误差为 2%。这些监测方法大多依赖于外部传感器或设备,对环境条件高度敏感,采集到的信号中会掺杂较多噪声。相比之下,嵌入式传感器在高温、振动和辐射环境下工作效果较好,受外部条件的影响较小,对内部损伤更为敏感^[11-12],例如 Rocha 等^[13]比较了埋在 CFRP 中面和其他贯穿厚度位置的光纤布拉格光栅测得的低速撞击产生的残余应变。Kefer 等^[14]证明了嵌入式聚合物平面布拉格光栅(polymer planar Bragg grating, PPBG)可检测 CFRP

组件的塑性变形,并在塑性变形和由此产生的布拉格信号偏移之间建立了线性相关关系。

锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)压电陶瓷传感器因体积小、重量轻、结构简单和使用寿命长而得到广泛应用^[15]。在早期的研究中,PZT 传感器被制成一种包含了电路层、绝缘层和传感器层的厚度为 0.254 mm 的薄膜结构(SMART layer^[16])。这些传感器具有布线灵活、集成度高等特点,适合嵌入复合材料层压板进行结构健康监测。Qin 等^[17]分析了嵌入薄膜结构的复合材料在不同加载条件(静载拉伸、压缩、三点弯曲)的力学性能,结果表明嵌入薄膜结构不会显著改变复合材料的机械性能。在此基础上,Masmoudi 等^[18]将直径 5 mm、厚度 0.5 mm 的圆形 PZT 传感器嵌入 CFRP 层合板中,并通过准静态拉伸试验证明了嵌入式传感器对板材拉伸性能的影响低于 6%。Chen 等^[19]使用超声波到达时间测量法,验证了将嵌入式 PZT 传感器用于玻璃纤维复合材料结构健康监测的可行性。然而,嵌入式 PZT 传感器在 CFRP 复合材料中的应用仍面临挑战,例如复合材料层压板在使用过程中复杂多变的内部应力状态会导致纤维滑移,最终导致 PZT 传感器绝缘不良^[20]。所以确保嵌入式 PZT 传感器的稳定绝缘是一个亟待解决的问题。

本文创新性地提出了一种基于嵌入式 PZT 传感器与 EMD 信号处理的 CFRP 疲劳监测方法,优化了传感器嵌入方法,解决了嵌入式传感器存活率低的问题。系统对比了 PZT 与 AE 信号在疲劳演化过程中的响应差异,详细研究了 PZT 信号的振幅特征与结构失效过程之间的关系。验证了该方法在早期损伤识别中的高灵敏性与工程适用性,为构建高鲁棒性的复合材料健康监测体系提供了新路径。

1 试验方案

1.1 材料制备

为减少嵌入式 PZT 传感器对 CFRP 层压材料机

械性能的影响,选择了直径为7 mm、厚度0.1 mm的PZT薄圆盘,其谐振频率约为15 MHz。碳纤维增强复合材料在宏观上表现出弱导电性,这会对压电陶瓷极化程度产生一定影响,进而影响传感器采集数据的可靠性^[21]。为确保传感器性能的可靠性,在嵌入之前对PZT传感器进行了绝缘处理,并优化了信号传输线路。现有研究中PZT圆片与信号传输线的连接大多采用焊接的方式,然而在复合材料层合板制备阶段,位于预浸料内部的压电陶瓷传感器会因模具挤压承受较大应力,而焊点的存在会使应力集中于压电陶瓷表面,很容易导致脆性压电陶瓷传感器出现损坏,失去采集信号的能力。因此,本文改进了PZT传感器的接线方式,选择利用普通压敏胶作为固定胶,将信号传输线固定在压电陶瓷圆片两端,构成闭合回路,实现传感器与信号传输线的连接。然后在传感器两侧均匀涂抹J-133双组分环氧树脂黏合剂,以实现牢固黏合。接着在80℃的保温箱中固化180 min,使黏合剂凝固。最后用砂纸仔细打磨传感器表面,以确保光滑和最佳接触效果。如图1所示,PZT传感器被放置在CFRP层压板的中间层,即第10层和第11层之间。后续为了对比优化前后传感器存活率,利用螺栓将复合材料层合板进行连接,并对连接结构进行断铅试验。

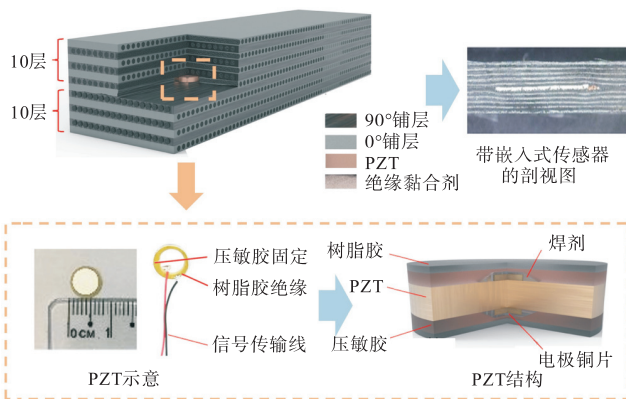


图1 CFRP中PZT传感器的嵌入和结构配置示意
Fig.1 Schematic of PZT sensor embedding and structural configuration within CFRP laminate

断铅试验是一种可靠的通过模拟损伤源对传感器进行检测及验证的方法^[22],通过断铅试验可以反映传感器对信号的采集能力。此外,断铅试验产生的信号与无干扰情况下复合材料连接结构内部碳纤维断裂产生的脉冲信号有一定的相似性,因此断铅试验得到的信号幅频特性对确定连接结构损伤过程中产生的信号的特征有一定的参考价值。图2给出了断铅试验装置,断铅试验是采用直径为0.5 mm的自动

铅芯在复合材料层合板螺栓连接结构上进行试验,分别在两端传感器铺设位置(图2中位置a、b)以及螺栓连接接头(图2中位置c)进行断铅,每次断铅时保证铅芯与试件表面的夹角为45°。

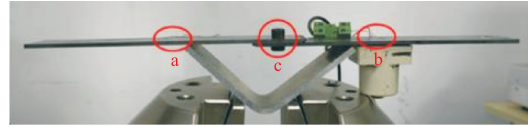


图2 断铅试验装置
Fig.2 Device for lead breakage test

在层压板制备方面,采用了真空袋法来提高含有PZT传感器的CFRP板材的致密性和层间结合强度^[23]。将预浸料装入标准模具,密封在真空袋内,并通过制造真空进行加压。随后加热固化,最终得到具有优异机械性能的产品。由于在温度达到材料的居里点(150~340℃)时会发生去极化^[24],为了防止PZT传感器在高温固化阶段去极化,将固化温度设定为125℃,持续时间为2.5 h。在整个过程中,真空袋内压力保持在0.33 MPa,平均真空压力98 kPa。CFRP层压板的层压顺序遵循标准的正交层压模式。层压板的最终尺寸为189 mm×36 mm×2.5 mm。此外,还在样品上加工了一个直径为8 mm的通孔,以便后续的螺栓连接,如图3所示。

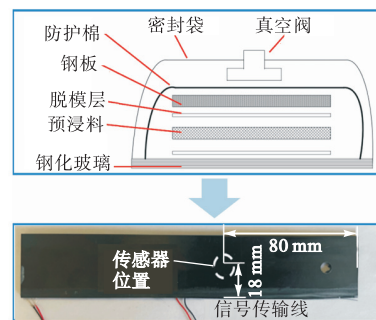


图3 制造带有嵌入式PZT传感器CFRP试样的真空袋工艺
Fig.3 Vacuum bagging process for manufacturing CFRP specimens with embedded PZT sensors

1.2 试验过程

为减少试验开始时因初始加载而产生过大的相对位移,使用校准扭矩扳手对连接结构的螺栓施加9 N·m的扭矩,以确保连接处有足够的摩擦力。在试样两侧插入黏结垫片,以确保施加的疲劳载荷与螺栓轴线保持垂直,从而消除可能影响测试结果的潜在弯矩。CFRP螺栓连接结构尺寸如图4所示。

为研究嵌入式PZT传感器对CFRP螺栓连接结

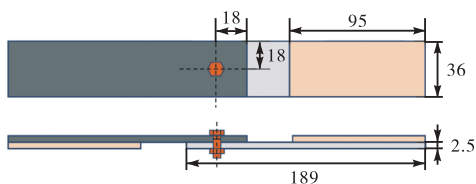


图 4 CFRP 螺栓连接结构尺寸(单位:mm)

Fig.4 Dimensions of CFRP bolted connection (unit: mm)

构力学性能的影响,本研究制作了 2 组试样,每组 5 件,其中一组埋设有 PZT 传感器,另一组未埋设. 疲劳试验结果显示,两组试样均在约 50 000 次循环后出现连接区域失效,主要表现为孔周局部压溃、分层扩展及纤维断裂等损伤模式. 2 组试样在失效形式与循环寿命上无显著差异,表明嵌入式 PZT 传感器的

引入不会显著降低 CFRP 螺栓连接结构的疲劳性能.

按照 ASTM D6873 标准,使用 LF5105 电液伺服疲劳试验机进行了疲劳试验. 施加载荷设定为 7 000 N,正弦加载,应力比为 0.1,加载频率为 10 Hz. 试验机程序设定为试样出现失效就自动停止加载,以记录完整的疲劳失效过程. 试验装置及信号采集过程如图 5 所示,使用 NI 9234 采集卡采集嵌入式 PZT 传感器的实时电压信号,并结合 LabVIEW 2019 软件进行数据采集和分析. 此外,还使用 2 个外部安装的 AE 传感器记录声发射 AE 信号. 使用 DS5-8A 声发射分析软件对这些信号进行分析,从而全面了解在整个疲劳加载过程中产生的声发射情况.

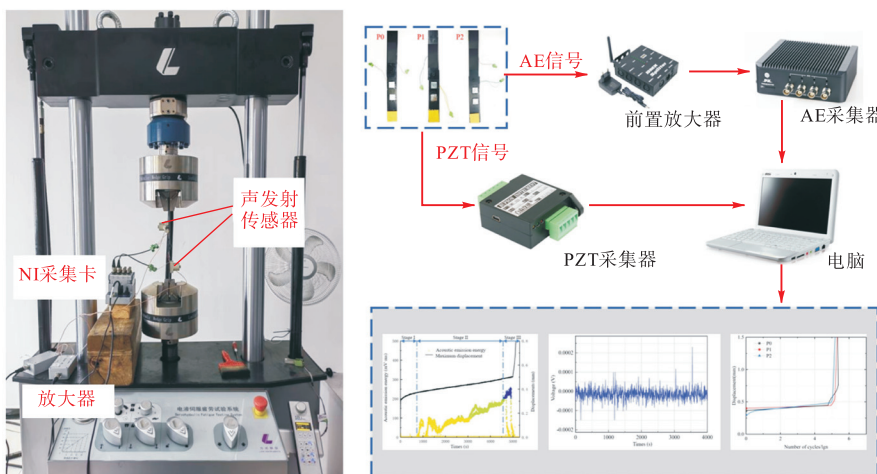


图 5 CFRP 疲劳监测的试验装置和信号采集过程

Fig.5 Test setup and signal acquisition process for CFRP fatigue monitoring

2 PZT 信号的 HHT 分析

希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 相比傅里叶变换和小波变换,在处理 CFRP 疲劳损伤声发射信号时,能更好适应信号的非线性与非平稳特性^[25],具有更高的时间-频率分辨率和损伤特征识别能力^[26]. HHT 包括两个主要阶段:经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特特频谱分析(Hilbert spectral analysis, HSA). EMD 的目的是将复杂、非线性和非稳态数据集分解为一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF). 这些 IMF 代表原始信号固有的各种振荡模式,可以对频率内容的时间变化进行详细分析. EMD 过程的具体步骤如图 6 所示.

EMD 程序首先要识别原始信号 $x(t)$ 中的所有局部极值. 识别出这些点后,利用 3 次样条插值将局部最大值和最小值连接起来,生成上包络和下包络. 然

后从原始信号中减去这 2 个包络的平均值(记为 $m(t)$),得到新的序列 $h(t) = x(t) - m(t)$. 对这个序列 $h(t)$ 进行检验,以确定它是否满足 IMF 的条件. 如果 $h(t)$ 满足 IMF 条件,则记录为第 1 个 IMF,即 $c_1(t)$. 否则,分解过程继续迭代,直到得到 1 个 IMF.

提取出 1 个 IMF 后,将其从原始信号中减去,得到残差,然后再经过同样的分解过程,得到下 1 个 IMF. 持续到残差 $r_n(t)$ 变成单调函数,分解过程结束. 此时,原始信号可表示为 IMF 和残差项的总和,如式(1)所述. 这种逐步分解法提供了 1 种高度自适应的信号表示方法,无需像小波分析中通常需要的同样预先定义基函数.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

式中 $y(t)$ 是 $x(t)$ 的希尔伯特变换.

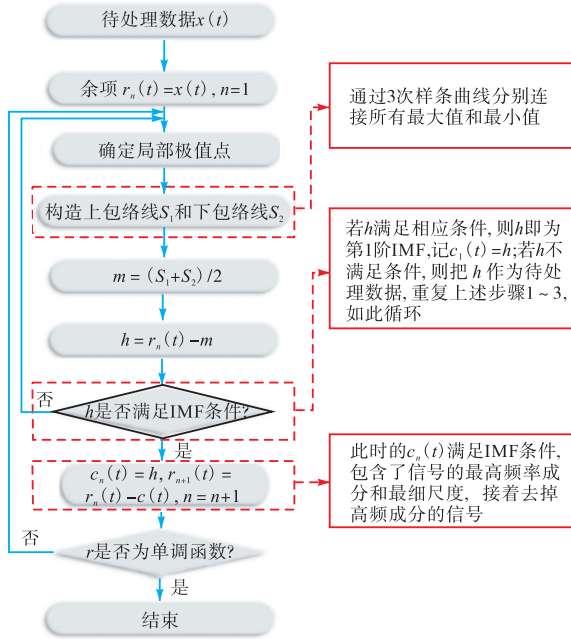


图 6 EMD方法的信号分解步骤

Fig.6 Signal decomposition steps of EMD method

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{jF(t)} \quad (3)$$

式中: $z(t)$ 为解析函数; $a(t)$ 为振幅函数.

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (4)$$

式中 $\omega(t)$ 是瞬时频率函数.

$$H(\omega, t) = \begin{cases} \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} & \omega_i(t) = \omega \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $H(\omega, t)$ 是希尔伯特频谱, 即原始信号振幅在频率平面和时间平面上的分布.

获得 IMF 后, 对每个 IMF 进行希尔伯特频谱分析. 希尔伯特变换用于从原始 IMF 构建解析函数 $z(t)$, 提供振幅 $a(t)$ 和瞬时频率 $\omega(t)$ 信息. 瞬时频率被定义为相位函数的导数. 该方法可对振幅和频率随时间的变化进行深入分析, 如式 (5) 所示, 使用希尔伯特频谱 $H(\omega, t)$ 将其直观地显示出来. 希尔伯特频谱提供了信号的三维表示, 描述了信号在不同频率和时间内的振幅, 从而揭示了信号的详细时间特征.

EMD 可以对信号进行自适应分解, 从而有效分析拉伸疲劳测试期间记录的 PZT 电压信号^[27]. PZT 信号首先经过滤波, 然后分解成 5 个 IMF, 如图 7 所示. 由此产生的希尔伯特-黄频谱 (Hilbert-Huang spectrum, HHS) 用于研究 PZT 信号在疲劳过程中的变化, 从而深入了解 CFRP 螺栓连接结构中损伤的进展情况.

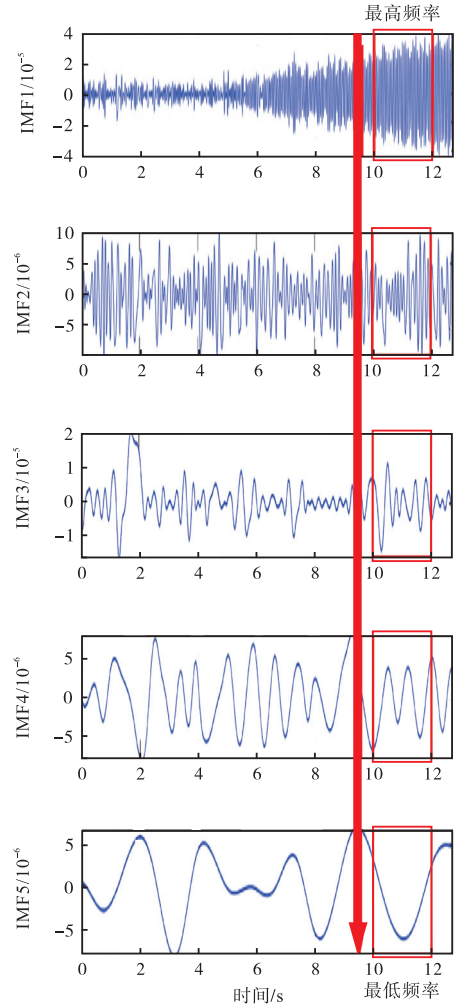


图 7 PZT 电压信号经 EMD 分解后得到的 5 层 IMF 信号

Fig.7 Five-layer IMF signal obtained by EMD decomposition of PZT voltage signal

3 结果与讨论

3.1 声发射传感器信号分析

在 CFRP 螺栓连接结构的拉伸疲劳试验过程中, 连续获得 AE 信号和 PZT 电压信号. 图 8 显示了整个疲劳过程中累积的声发射能量, 可作为划分不同疲劳损伤阶段的参考. 根据声发射信号和最大位移的演变, 螺栓连接结构的整个失效过程可分为 3 个不同的阶段: 初始疲劳、损伤累积和最终失效^[28]. 已有研究表明^[29], 界面脱黏通常对应中频段信号, 具有中等幅值和中等能量, 反映了纤维与基体之间结合强度的局部失效; 基体裂纹与分层信号特征为低频长持续时间, 能量相对较低, 主要反映树脂基体内部的脆性开裂及层间黏结失效; 纤维断裂表现为高频、高幅值和高能量信号, 是结构性能快速退化的主要征兆, 常发生于疲劳晚期或应力集中部位.

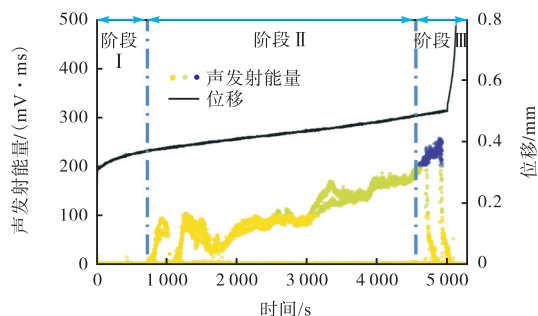


图 8 CFRP 螺栓连接结构疲劳期间累积的声发射信号
Fig.8 Cumulative acoustic emission signals during fatigue of CFRP bolted connection

阶段 II 持续约 8 000 个周期, 期间 AE 能量始终保持在 100 mV · ms 以下. 相应的位移曲线呈现缓慢的非线性增长. 这一阶段与材料的弹性响应相对应, 只发生轻微的内部摩擦, 没有明显的裂纹产生. 有限的 AE 信号表明, 损坏仅限于微尺度的内部重新排列, 不会对螺栓连接的整体完整性产生重大影响. 阶段 II 中 AE 能量显著增加, 从 100 mV · ms 到约 200 mV · ms. AE 能量的增加表明 CFRP 材料内部微裂纹的产生和扩展, 导致损伤累积. 在这一阶段, 最大位移曲线呈线性增长, 表明连接结构正在经历影响刚度的渐进式损坏. AE 信号的持续增长表明了内部损伤的不断累积, 开始出现分层和纤维断裂, 削弱了 CFRP 接头的结构完整性. 阶段 III 代表螺栓连接结构的最终失效, 此时 AE 能量猛增至 250 mV · ms 左右, 达到整个疲劳过程的峰值. 同时观察到最大位移也突然增加, 表明从局部损坏迅速过渡到结构失效. 最大位移的急剧上升进一步证实了材料在向完全破坏过渡时承载能力的迅速降低. 这一阶段的特点是内部裂纹密集增长和凝聚, 最终导致连接部分分离和整个结构失效.

总之, 阶段 II AE 能量的逐渐增加表明了损伤的累积, 而阶段 III 的突然增加则意味着即将发生破坏. 这些发现与之前对复合材料的研究结果一致, 证明了在本次试验中, AE 监测信号可以有效捕捉 CFRP 螺栓连接内部损伤演变. 可被用于预测和识别 CFRP 螺栓连接结构临界损伤的发生.

3.2 压电陶瓷传感器信号分析

通过断铅试验, 可以发现 PZT 传感器信号在 0 ~ 1.5 kHz 之间均有较为明显的幅值波动, 且在 20 Hz 以内有着较高幅值, 如图 9 所示, 证明了复合材料层合板内传感器仍有信号采集能力. 反之, 如果没有采集到相关信号则证明传感器失效. 在使用传统嵌入方法的 10 个 PZT 传感器中, 只有 4 个传感器可以接收到信号. 使用优化后嵌入方法的 10 个 PZT 传感器

中, 有 8 个传感器可以接收到信号, 存活率由 40% 提高到 80%.

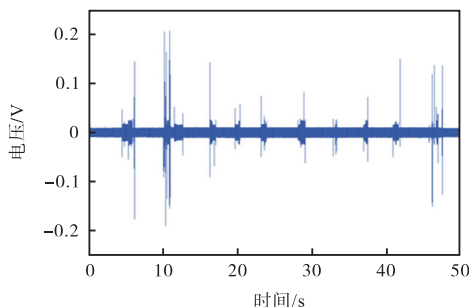


图 9 断铅试验中的 PZT 采集到的原始信号
Fig.9 Raw signals acquired by the PZT in the lead break-age test

图 10 显示了 PZT 传感器在载荷为 7 000 N、加载频率为 10 Hz 时 CFRP 螺栓连接结构拉伸疲劳失效过程 PZT 传感器采集到的原始电压信号. 由于存在噪声和原始信号的复杂性, 直接识别和观察疲劳损伤的演变具有挑战性. 因此, 采用了带通滤波和 HHT 对信号进行细化和分析. 为了提高原始信号的可解释性, 采用了 0 ~ 15 Hz 的带通滤波器, 有效消除了交流电干扰产生的 50 Hz 工频噪声. 滤波后的信号如图 11 所示, 突出的频率成分是 10 Hz. 该频率与疲劳试验中的加载频率一致, 表明 PZT 传感器的最强压电响应与加载频率有关. 在后续分析中, 主要关注信号中频率为 10 Hz 的部分, 因为它捕捉到了加载周期引起的最相关的机械振动.

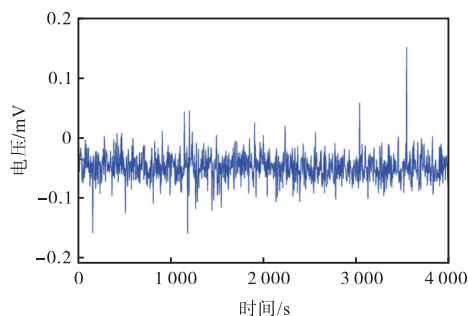


图 10 7 000 N 疲劳载荷下拉伸疲劳过程 PZT 原始信号
Fig.10 PZT raw signal during tensile fatigue testing under 7 000 N fatigue load

图 12 为拉伸疲劳最初 25 s 期间 PZT 信号的时频表示. 值得注意的是, 在早期加载阶段, 10 Hz 频率分量的幅值逐渐增大, 在 20 s 左右达到 2.17×10^{-9} V 的峰值, 最终趋于稳定. 信号幅值的逐渐增加可归因于螺栓连接处载荷的重新分布, 这反映了复合材料在循环加载下的内部响应. 这种行为符合典型的微损伤机制, 如基体开裂和界面脱黏导致 PZT 传感器检

测到的能量耗散增加. PZT 传感器捕捉疲劳加载过程中特定频率成分的能力对于了解内部损伤的演变至关重要. 随着加载的进行, 振幅最终趋于稳定, 表明已过渡到稳态损伤累积阶段, 此时结构变形变得更加均匀.

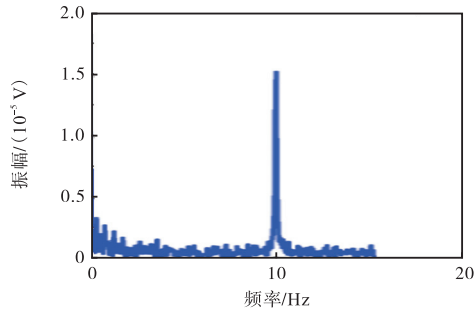


图 11 滤波处理后的 PZT 电压信号幅频图 (0~25 s)

Fig.11 Amplitude-frequency diagram of filtered PZT voltage signal (0—25 s)

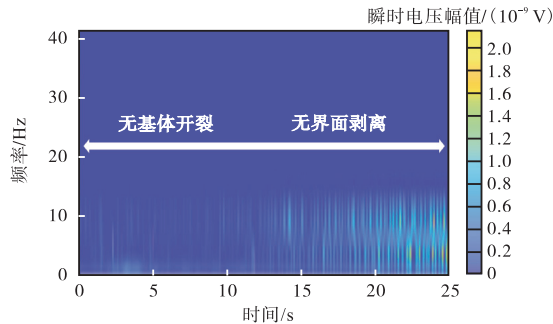


图 12 CFRP 螺栓连接结构拉伸疲劳过程 PZT 信号 HHT 时频图 (0~25 s)

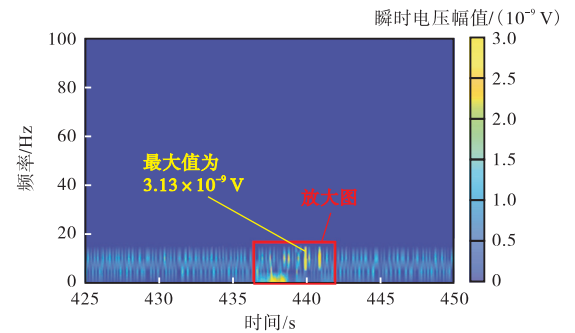
Fig.12 HHT time-frequency diagram of PZT signal during tensile fatigue testing of CFRP bolted connection (0—25 s)

3.3 CFRP 螺栓连接疲劳失效的信号表征

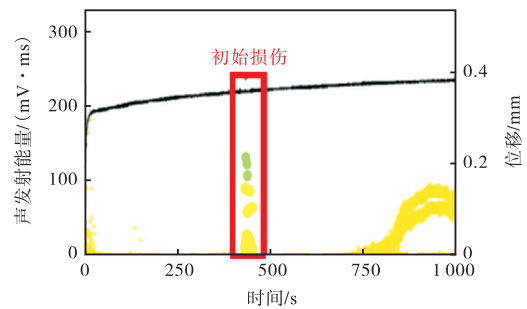
对 CFRP 螺栓连接疲劳失效的信号特征进行了分析, 以全面了解损伤的发展过程, 并评估嵌入式 PZT 传感器在实时健康监测中的有效性. 对照分析了 AE 传感器和嵌入式 PZT 传感器的结果, 以便将特定信号特征与整个疲劳生命周期的损伤演变联系起来. 同时, 当损伤信号出现后, 停止加载, 将连接结构拆解并对损伤部位拍摄 SEM 图片.

在疲劳加载过程中, 图 13 所示 PZT 信号在约 440 s 时于 10 Hz 频段突现幅值跃增, 同时 AE 信号能量同步升高, 表征结构内部出现了应力集中区域的剧烈响应变化. 结合图 14 对同一阶段螺栓孔周界面区域的 SEM 观察结果发现, 该阶段材料内部已出现沿层间界面的微裂纹萌生, 其特征表现为基体局部开裂及纤维-基体脱黏. 图 13 (b) 给出的声发射对照图标明了典型的裂纹尖端、界面剥离迹象. 该损伤形貌为

疲劳失效初始阶段(阶段 I)的代表性特征, 说明在应力集中作用下, 界面层最先出现破坏, 其次向基体内部扩展. PZT 信号中特征频率的突变可视为裂纹形成的声响应特征, 表明传感器对微裂纹的萌生具有较高的响应灵敏度, 具备早期预警能力.



(a) 时频图



(b) 声发射对照图

图 13 结构拉伸疲劳过程 PZT 信号 HHT 时频图 (425~450 s)

Fig.13 HHT time-frequency diagram of the PZT signal during tensile fatigue testing (425—450 s)

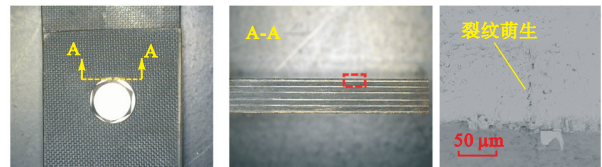
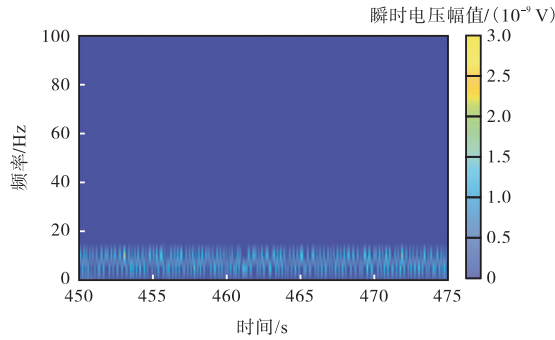


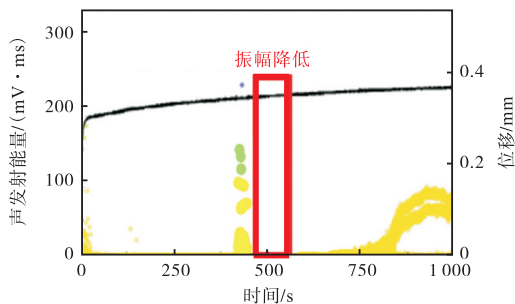
图 14 连接结构拉伸疲劳过程第 440 s 时损伤图

Fig.14 Damage map at 440 s during tensile fatigue testing of connection

进入损伤扩展阶段(阶段 II), 如图 15 所示, PZT 信号中 10 Hz 频率分量的幅值较前一阶段略有下降, 表明裂纹萌生后出现了局部扩展, 但尚未贯通, 局部应力释放导致信号响应回落. 图 16 中 SEM 图像揭示了更深层的裂纹路径, 并显示出明显的纤维层间剥离现象, 裂纹沿界面扩展, 且孔周区域受到螺栓挤压产生分层破坏. 该阶段虽未出现 AE 能量的突跃式增长, 但界面微裂纹持续扩展, 说明连接结构进入“缓慢积累—渐进破坏”过程, 界面韧性明显下降, 扩展阻力减弱, 逐步向失效状态推进.



(a) 时频图



(b) 声发射对照图

图 15 结构拉伸疲劳过程 PZT 信号 HHT 时频图 (450 ~ 475 s)
 Fig.15 HHT time-frequency diagram of PZT signal during tensile fatigue testing (450—475 s)

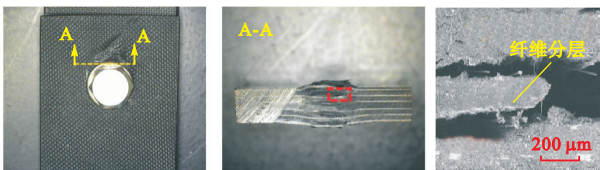
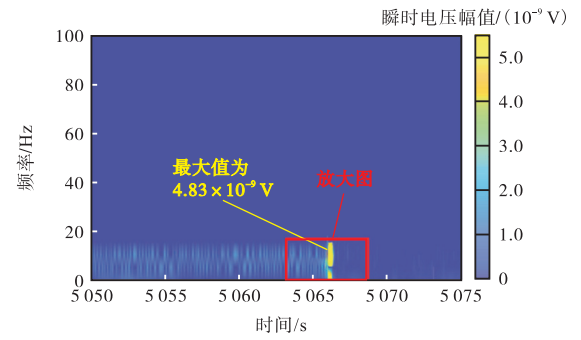
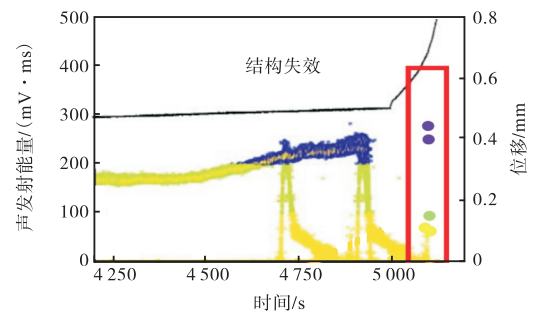


图 16 连接结构拉伸疲劳过程第 500 s 时损伤图
 Fig.16 Damage map at 500 s during tensile fatigue testing of connection

如图 17 所示,在进入最终失效阶段(阶段Ⅲ)时,PZT 信号如图所示在 5 050 ~ 5 075 s 内发生显著突变,10 Hz 频率分量振幅急剧上升至 4.83×10^{-9} V,随后快速衰减,伴随声发射能量同步爆发,标志结构临近破坏.图 18 中的 SEM 图像显示,螺栓孔周已出现明显的层间撕裂与纤维束整体断裂,损伤跨越多个铺层,呈现典型的多机制耦合破坏模式.裂纹从界面处逐步贯穿至纤维层内部,最终导致局部失稳并诱发结构整体断裂.PZT 响应的振幅激增准确反映了该阶段裂纹加速扩展和能量释放过程,验证了其临界失效状态的高度敏感性.图中所示信号幅值峰值的变化趋势进一步与 AE 能量变化保持一致,说明低频 PZT 信号可有效追踪 CFRP 接头从裂纹贯通至纤维断裂的失效路径,为评估结构剩余寿命提供了可靠依据.



(a) 时频图



(b) 声发射对照图

图 17 结构拉伸疲劳过程 PZT 信号 HHT 时频图 (5 050 ~ 5 075 s)
 Fig.17 HHT time-frequency diagram of PZT signal during tensile fatigue testing (5 050—5 075 s)

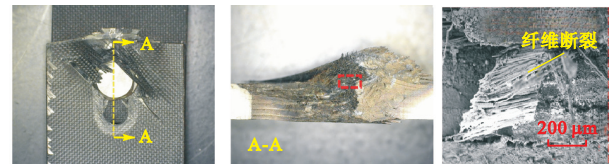


图 18 连接结构拉伸疲劳过程第 5 100 s 时损伤图
 Fig.18 Damage map at 5 100 s during tensile fatigue testing of connection

为了建立连接结构的整个寿命周期内基于 HHT 时频分析方法处理得到的 PZT 信号中 10 Hz 频率分量的幅值与结构内部损伤之间的联系,选择以声发射能量的变化作为连接结构内部出现损伤的表征,以每 100 s 为一阶段,基于 HHT 方法计算该阶段信号中 10 Hz 频率分量的最大幅值,拟合出该频率分量幅值的变化曲线并与声发射能量变化趋势对照,得到的结果如图 19 所示.从图 19 中可以发现该频率分量的幅值与连接结构损伤是对应的.随着损伤的积累,该频率分量的幅值会达到最大值,并在结构失效后归零.

为进一步明确不同频率分量的 PZT 信号在反映疲劳损伤演化中的代表性,本文对其频域特征与 AE 能量之间的相关性进行了分析.选取 10 Hz、20 Hz 和 30 Hz 共 3 种典型频率分量,分别提取其幅值随时间的演化曲线,并与 AE 能量进行对比,如图 20 所示.

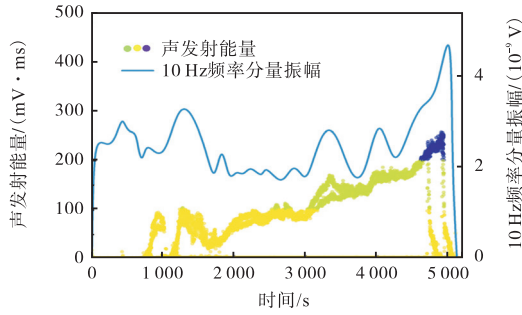


图 19 连接结构疲劳寿命内 PZT 信号 10 Hz 频率幅值与声发射能量

Fig.19 10 Hz frequency amplitude of PZT signal and acoustic emission energy during fatigue life of connection

为定量描述两者之间的关系，引入皮尔逊相关系数 r ，其定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中： x_i 和 y_i 分别为时刻 i 下 10 Hz 分量振幅和 AE 能量； \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_i 、 y_i 的均值。 r 趋近于 1 表示强正相关， $r = 0$ 表示不相关。计算结果表明，10 Hz 分量与 AE 能量的相关系数约为 0.82，呈现出显著正相关性；而 20 Hz 和 30 Hz 分量的幅值变化幅度较小，与 AE 能量变化趋势不一致，对应的相关系数分别为 0.21 和 0.13，相关性极弱，几乎不具备损伤映射能力。

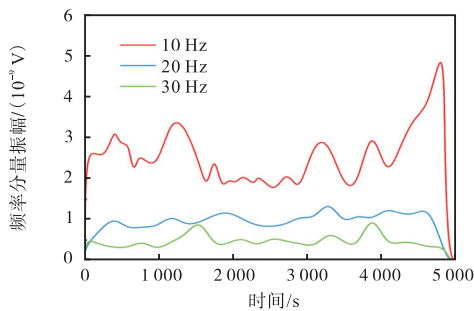
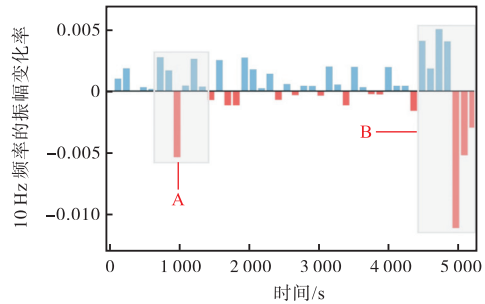


图 20 连接结构疲劳寿命内 PZT 信号不同频率分量的幅值变化

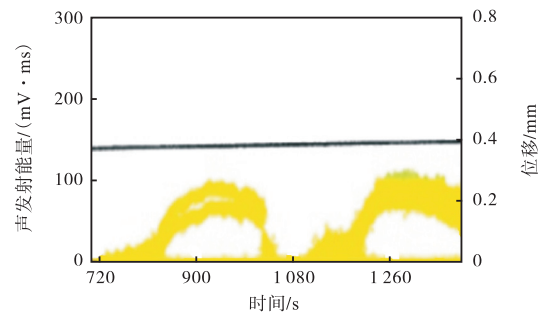
Fig.20 Amplitude variation of components with different frequencies of PZT signals during fatigue life of connection

疲劳加载期间 10 Hz 频率分量振幅变化率与声发射能量变化之间的关系如图 21 所示。从图 21 可以看出随着声发射能量信号的每次跃升，幅值变化率均会表现为正值。当损坏趋于稳定时，声发射能量保持相对恒定，幅值变化率均会表现为负值。这种行为表明，振幅变化率对损坏的进展高度敏感。PZT 信号的这一特性使其能够在疲劳过程中准确监测螺栓结

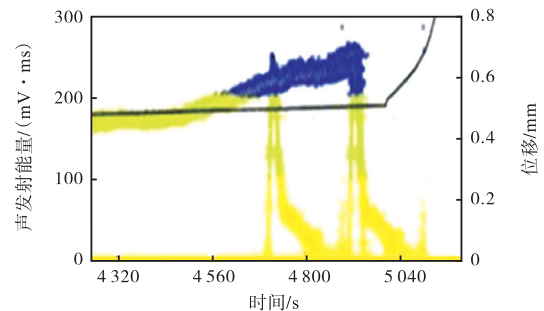
构中损伤的开始、发展和最终破坏。但应注意的是，振幅变化率与损伤严重程度并不呈正比。



(a) 振幅变化率



(b) 图(a)区域 A 声发射对照图



(c) 图(a)区域 B 声发射对照图

图 21 连接结构疲劳过程 PZT 信号 10 Hz 频率分量的幅值变化率

Fig.21 Amplitude change rate of 10 Hz frequency component of PZT signal during fatigue of connection

此外，还使用短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, STFT) 处理原始数据，并将 10 Hz 频率分量振幅的变化趋势曲线与声发射能量的变化趋势进行比较，结果如图 22 所示。通过 HHT 和 STFT 方法得出的特定频率分量下 PZT 信号振幅的变化曲线显示出明显的差异。STFT 结果显示了更多细节和更高的信号波动频率，但信号波动范围相对固定 (-70 ~ -60 dB)，因此难以直接评估连接结构的损坏状态。相比之下，HHT 方法能更全面地评估细节和整体受损阶段。分析结果表明，HHT 方法能有效描述 PZT 信号特定频率成分的振幅变化，从而准确监测 CFRP 螺栓连接结构的损伤开始、演变和破坏情

况. PZT 信号与声发射能量之间的相关性为全面监测承受疲劳载荷的复合材料连接结构的健康状况提供了一种可靠的方法.

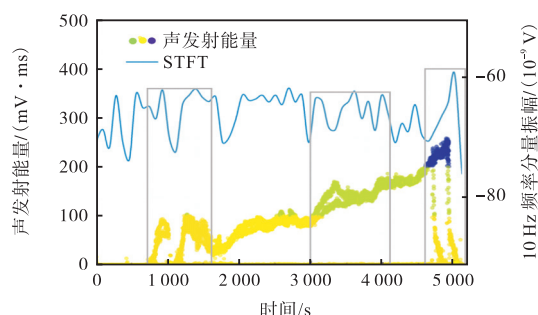


图 22 拉伸疲劳过程 PZT 信号 10 Hz 频率幅值与声发射能量对比

Fig.22 Comparison of PZT signal 10 Hz frequency amplitude and acoustic emission energy during tensile fatigue testing

4 结 论

本文介绍了一种使用嵌入式 PZT 传感器对 CFRP 螺栓连接结构进行健康监测的方法,通过拉伸疲劳试验和信号表征分析了失效过程,主要结论如下.

(1) 对 PZT 的嵌入方法进行了相关优化,优化后的嵌入方法显著提升了 PZT 传感器的存活率,传感器存活率由 40% 提高至 80%,提升了 40%. 显著增强了系统的信号获取能力与数据完整性,为结构健康监测提供了更可靠的基础.

(2) 安装嵌入式传感器后,试样的疲劳寿命与未安装传感器的试样没有明显差异,都达到了约 50 000 次疲劳循环后才发生失效. 这证实了嵌入式传感器对 CFRP 层压材料拉伸疲劳性能的影响微乎其微. 安装嵌入式 PZT 传感器的连接结构在经历 50 000 次疲劳循环加载后仍保持信号响应活跃,表明该传感器具备良好的结构兼容性与抗疲劳耐久性.

(3) 使用 HHT 时频分析方法对嵌入式 PZT 信号进行处理,结合不同损伤阶段 SEM 图像与 AE 能量变化,实现了结构疲劳演化全过程的分阶段识别. 结果表明,10 Hz 频率分量振幅在损伤初始、扩展和失效阶段具有显著特征变化,且与 AE 能量的皮尔逊相关系数高达 0.82,显著优于 20 Hz 与 30 Hz 等分量,验证了加载频率一致性对损伤映射能力的主导作用. 该特征分量可作为结构疲劳损伤早期预警与演化监测的关键指标.

参考文献:

[1] Hung P Y, Lau K T, Cheng L K, et al. Impact

response of hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer composites designed for engineering applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 133: 86-90.

[2] 施钟淇, 秦 敢, 杨 帆. 内贴 CFRP 加固圆形隧洞弧形界面力学性能研究 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023, 56(3): 323-331.

Shi Zhongqi, Qin Gan, Yang Fan. Research on the mechanical performance of the curved substrate of a circular tunnel strengthened with CFRP internal bonding [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2023, 56(3): 323-331 (in Chinese).

[3] 伍希志, 林 彬, 程军圣, 等. 裂纹钢板的止裂孔与 CFRP 加固及其疲劳寿命预测[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(2): 154-158.

Wu Xizhi, Lin Bin, Cheng Junsheng, et al. Cracked steel plates repaired by stop holes and CFRP and fatigue life prediction[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(2): 154-158 (in Chinese).

[4] Luo K, Chen L, Liang W, et al. A dual-scale morphological filtering method for composite damage identification using FBP[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 184: 109683.

[5] Rus J, Gustschin A, Mooshofer H, et al. Qualitative comparison of non-destructive methods for inspection of carbon fiber-reinforced polymer laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(27): 4325-4337.

[6] Wen X L, Sun Q Z, Li W H, et al. Localization of low velocity impacts on CFRP laminates based on FBG sensors and BP neural networks[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(26): 5478-5487.

[7] Rajalekshmi T, Das R R, James A. Graphene based piezoresistive pressure sensor for structural health monitoring[C]//2024 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON). Goa, India, 2024: 10465920.

[8] Rheinfurth M, Kosmann N, Sauer D, et al. Lamb waves for non-contact fatigue state evaluation of composites under various mechanical loading conditions [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(8): 1203-1211.

[9] Wagner J, Wilhelm M, Baier H, et al. Experimental analysis of damage propagation in riveted CFRP-steel structures by thermal loads[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75: 1103-1113.

- [10] Fazzi L, Valvano S, Alaimo A, et al. A simultaneous dual-parameter optical fibre single sensor embedded in a glass fibre/epoxy composite[J]. *Composite Structures*, 2021, 270: 114087.
- [11] Bach M, Dobmann N, Eckstein B, et al. Reliability of CO-bonded piezoelectric sensors on CFRP structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2013(1): 536-542.
- [12] Fernández-Medina A, Frövel M, López H R, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench[J]. *Sensors*, 2023, 23(14): 6499.
- [13] Rocha H, Lafont U, Nunes J P. Optimisation of through-thickness embedding location of fibre bragg grating sensor in CFRP for impact damage detection[J]. *Polymers*, 2021, 13(18): 3078.
- [14] Kefer S, Sauer T, Hessler S, et al. Robust polymer planar bragg grating sensors embedded in commercial-grade composites[J]. *Polymers*, 2020, 12(3): 715.
- [15] Zheng Z Q, Miao X L, Huang X Z, et al. Fastening reliability analysis of bolted joint anti-self-loosening[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 202: 107776.
- [16] Benaboud S, Takarli M, Pouteau B, et al. Fatigue damage monitoring and analysis of aged asphalt concrete using acoustic emission technique[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22(supp1): 592-603.
- [17] Qin R Z, Nong J, Wang K Q, et al. Recent advances in flexible pressure sensors based on MXene materials[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(24): 2312761.
- [18] Masmoudi S, El M A, Turki S. Effect of piezoelectric implant on the structural integrity of composite laminates subjected to tensile loads[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24: 39-54.
- [19] Chen X, Meyer Y, Lachat R, et al. Structural health monitoring of a smart composite structure with a Time-of-Flight method[J]. *Proceedings of the MEDYNA*, 2017(2): 25-28.
- [20] Abdulkarem M, Samsudin K, Rokhani F Z, et al. Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(3): 693-735.
- [21] Forintos N, Czigany T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers—A short review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 331-343.
- [22] Jiang Y, Xu F Y, Xu B S. Acoustic emission tomography based on simultaneous algebraic reconstruction technique to visualize the damage source location in Q235B steel plate[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 64: 452-464.
- [23] Vita A, Castorani V, Germani, M, et al. Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105: 1967-1982.
- [24] Wu J G, Shi H D, Zhao T L, et al. High-temperature BiScO₃-PbTiO₃ piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(39): 7186-7194.
- [25] Muir C, Swaminathan B, Almansour A, et al. Damage mechanism identification in composites via machine learning and acoustic emission[J]. *NPJ Computational Materials*, 2021, 7(1): 95-110.
- [26] Teng F Y, Wei J T, Lü S S, et al. Damage localization in carbon fiber composite plate combining ultrasonic guided wave instantaneous energy characteristics and probabilistic imaging method[J]. *Measurement*, 2023, 221: 113443.
- [27] Chen W, Ma X H, Ma Q L, et al. Denoising method of the Φ -OTDR system based on EMD-PCC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(10): 12113-12118.
- [28] Barile C, Casavola C, Pappalettera G, et al. Experimental wavelet analysis of acoustic emission signal propagation in CFRP[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 210: 400-407.
- [29] Wevers M. Listening to the sound of materials: Acoustic emission for the analysis of material behaviour[J]. *NDT & E International*, 1997, 30(2): 99-106.

(责任编辑: 王晓燕)