

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513765

基于声发射技术的 CFRP/steel 粘接接头损伤行为研究

张志远, 徐长航, 王文奥, 李娜, 王龙博

(中国石油大学(华东)机电工程学院 青岛 266580)

摘要: 碳纤维增强复合材料/钢(CFRP/steel)粘接接头在桥梁和船体结构加固中应用广泛,其力学性能受搭接长度的显著影响。针对现有研究中损伤演化机理揭示不足、识别精度有限的问题,提出了一种融合声发射(AE)与数字图像相关(DIC)技术的损伤监测与搭接长度识别方法。选取 25、50、75 和 100 mm 这 4 种搭接长度,在准静态拉伸加载过程中采集 AE 信号的幅值、能量、质心频率、均方根(RMS)及持续时间等特征参数,并结合 DIC 的全场应变分布,分析接头的损伤起始、扩展以及失效模式的演化规律。研究表明,接头损伤过程可分为 3 个阶段,失效模式主要有钢变形、纤维断裂、基体开裂、粘结失效和内聚失效。另外,搭接长度对接头的力学性能有显著影响,其中搭接长度为 100 mm 的接头的极限拉伸载荷为 60.70 kN,约为 75 mm 接头的 2 倍。然后,以声发射的特征参数为输入,构建了基于极限梯度提升树(XGBoost)的 CFRP/steel 粘接接头搭接长度识别模型,识别准确率高达 94%。最后,在该模型中引入可加性解释模型(SHAP)量化各特征贡献度,结果发现质心频率、RMS 与持续时间是关键特征。该研究揭示了搭接长度对接头损伤行为的作用机制,有效挖掘了声发射特征与接头损伤状态之间的关系,从而提升了损伤预测的准确性与解释能力,为 CFRP/steel 粘接接头的失效模式预测和结构优化设计提供了重要参考。

关键词: CFRP/steel 粘接接头;声发射;数字图像相关;损伤演化;XGBoost 模型;SHAP 模型

中图分类号: TH871 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Damage behavior investigation of CFRP/steel bonded joints based on AE technology

Zhang Zhiyuan, Xu Changhang, Wang Wenao, Li Na, Wang Longbo

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer/steel (CFRP/steel) bonded joints are widely used in the reinforcement of bridge and ship structures, and their mechanical performance is significantly affected by overlap length. To address the insufficient understanding of damage evolution mechanisms and the limited recognition accuracy in existing studies, a damage monitoring and overlap length identification method is proposed by integrating acoustic emission (AE) and digital image correlation (DIC) techniques. Four overlap lengths of 25, 50, 75, and 100 mm are tested under quasi-static tensile loading. During the tests, AE signal features including amplitude, energy, centroid frequency, root mean square (RMS), and duration are collected, while full-field strain distributions are obtained using DIC to analyze the damage initiation, propagation, and failure mode evolution of the joint. The results show that the damage process can be divided into three stages, with five main failure modes identified: steel deformation, fiber fracture, matrix cracking, adhesive failure, and cohesive failure. In addition, overlap length has a significant influence on the mechanical performance of the joints, and the joint with an overlap length of 100 mm achieved an ultimate tensile load of 60.70 kN, approximately twice that of the 75 mm joint. Based on the AE features, an extreme gradient boosting (XGBoost) classification model is formulated for identifying the overlap length of CFRP/steel bonded joints, achieving a recognition accuracy of 94%. Furthermore, the shapley additive explanation (SHAP) method is incorporated into the model to quantify the contribution of each feature, revealing centroid frequency, RMS, and duration as the most critical parameters. This study reveals the influence of overlap length on damage behavior of the joint, effectively uncovers the relationship between AE features and damage states, and improves the accuracy and interpretability of damage prediction,

providing valuable guidance for failure mode prediction and structural optimization design of CFRP/steel bonded joints.

Keywords: CFRP/steel bonded joints; acoustic emission; digital image correlation; damage evolution; XGBoost model; SHAP model

0 引言

近年来,碳纤维增强环氧树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)因其高强度、轻量化和优异的抗疲劳性能,在钢结构加固和修复中发挥着重要作用^[1-4]。与传统焊接技术相比,粘接技术能够有效减少应力集中,减轻结构重量^[5-6]。在工程上,桥梁结构和船体结构在其使用寿命期间经常会受到外界载荷的影响,因此许多桥梁和船体结构在服役过程中会出现损伤。为了延长这些结构的使用寿命,通常需要利用加固策略来降低这些损伤位置产生的风险。

最近,人们使用 CFRP 层合板来加固存在损伤的桥梁结构和船体结构,形成碳纤维增强复合材料/钢(carbon fiber reinforced polymer/steel, CFRP/steel)结构。在 CFRP/steel 结构中,搭接长度和粘胶层厚度对 CFRP/steel 粘接接头的力学性能至关重要。合理设计 CFRP/steel 粘接接头可以显著提高结构的承载能力,并避免脱粘等失效模式的发生^[2,7-8]。李晓虎等^[9]通过实验和数值模拟方法,探讨了粘胶层厚度不均匀对 CFRP/steel 界面粘接性能的影响。研究发现,粘胶层厚度不均匀显著降低了结构的承载能力。王海涛等^[10]通过实验研究了粘胶层和预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响。结果表明,CFRP 板有无粘胶具有相近的加固效果,但有预应力的 CFRP 板能显著提高钢梁的抗弯性能。李游等^[11]研究了高温环境对 CFRP/steel 界面力学性能的影响,结果发现结构的极限承载力随温度升高先增大后减小,高温下荷载-位移曲线具有明显的延性发展阶段。尽管 CFRP/钢粘接接头具有优异的力学性能,但在承受拉伸载荷时,常会产生各种损伤,降低结构的强度。因此,采用适当的无损检测技术是确保接头长期稳定使用的关键。

最近,各种无损检测技术已被广泛应用于复合材料接头的损伤检测。常见的无损检测技术包括机电阻抗、导波、红外热成像、声发射和数字图像相关技术等。张玉彬等^[12]提出了一种增强型电磁感应热成像检测方法,实现了 CFRP/steel 胶接结构的内部损伤。他们通过卷积自编码器(convolutional autoencoder, CAE)提取了 pixels 级深度热特征,有效提高了损伤的可视化程度。Wang 等^[13]采用机电阻抗(electromechanical impedance, EMI)技术对 CFRP/steel 接头的脱胶损伤进行了研究。结果表明,脱胶损伤程度与 EMI 具有完美的相关性。然而,EMI 技术难以检测复杂结构的缺陷^[14]。Wojtczak 等^[15]采用超声导波技术对 CFRP/steel 粘接接头的损伤可视

化进行了研究。结果表明,所提出的加权均方根(weighted root mean square, WRMS)直方图可以确定试样的损伤程度。然而,超声导波法不适用于小尺寸试样的损伤检测^[16-18]。Xie 等^[19]利用涡流脉冲热成像技术(eddy current pulsed thermography, ECPT)检测 CFRP/steel 接头的缺陷,结果表明 ECPT 具有检测 CFRP/steel 接头缺陷的能力。然而,ECPT 技术在损伤演化的实时监测方面仍然面临严峻挑战^[20]。

与上述方法相比,声发射(acoustic emission, AE)技术是一种被动式、高灵敏度的动态无损检测手段。它通过采集材料在损伤演化过程中释放的瞬时弹性波,能够在早期阶段识别如纤维断裂、基体开裂和界面剥离等损伤机制。AE 技术不仅适用于结构服役过程中的实时在线监测,还能通过多参数特征(如幅值、频率、持续时间等)对不同损伤源进行识别和分类,具备良好的拓展性和解释能力^[21-25]。此外,数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术也为研究接头的应变分布和损伤扩展提供了可靠的实验数据支持。周灵杰等^[26]通过三点弯曲试验和声发射技术,探究了 CFRP 加固钢在不同加固方式下的抗弯强度和能量吸收性能。Droubi 等^[27]利用 AE 技术检测了碳钢接头中的 3 种焊接缺陷,结果表明 AE 技术在缺陷识别方面具有显著的潜力。Shiraiwa 等^[28]基于数值模拟和 AE 技术研究了氢致开裂行为。结果表明,声发射技术可以准确地预测高强度钢的开裂行为。Xu 等^[29]使用一种新型设计的传感器监测了复合材料接头在拉伸过程中的脱粘行为和健康状态。Anay 等^[30]应用 AE 和 DIC 技术研究了自动纤维铺设(automated fiber placement, AFP)缺陷对 CFRP 试件在拉伸和弯曲载荷下损伤扩展的影响。结果表明,累积信号强度(cumulative signal strength, CSS)可以准确描述试样中缺陷所产生的作用。Samborski 等^[31]利用声发射技术研究了 CFRP 层压板的分层过程。研究结果揭示了与分层过程相关的多种损伤机制。

搭接长度是决定粘接接头载荷传递路径和应力分布模式的关键结构参数。已有研究表明,较短的搭接长度更容易形成应力集中区域,导致脆性界面剥离,而较长的搭接长度则有利于应力的渐进演化与多损伤协同发展,进而影响失效模式的演化^[32-36]。最近几年,许多人对复合材料接头的搭接长度进行了大量研究。Sun 等^[37]基于三维 Hashin 失效准则开发了单搭接粘接接头的有限元模型,研究了接头的搭接长度、被粘物宽度和堆叠顺序对接头力学性能的影响,结果发现实验结果与数值模拟结果具有很好的一致性。Li 等^[38]研究了复合材料粘接接

头的搭接长度、被粘物厚度和搭接宽度对复合材料粘接接头拉伸性能的影响。结果发现随着被粘物厚度、搭接长度和宽度的增加,具有脆性粘合剂的粘接接头的拉伸强度也会相应提高。Ozel 等^[39]分别使用数值模拟和实验测试研究了具有不同配置的铝和复合被粘物的单搭接接头 (single-lap joint, SLJ) 在拉伸载荷下的力学性能。结果表明,搭接长度、被粘物厚度和复合材料堆叠顺序等因素对 SLJ 的应力分布和极限破坏载荷有影响。

然而,关于不同搭接长度下 CFRP/steel 粘接接头的损伤特征、演化机制以及 AE 信号特征对接头失效模式的影响,仍缺乏系统性的研究。为了解决这一问题,基于 AE 和 DIC 技术,结合准静态拉伸实验,对 4 种不同搭接长度(25、50、75 和 100 mm)的 CFRP/steel 粘接接头进行了系统研究。通过分析 AE 信号的质心频率、均方根值 (root mean square, RMS)、持续时间等特征,探讨了各搭接长度下的损伤演化机制,并利用极限梯度提升树 (extreme gradient boosting, XGBoost) 算法建立了接头的搭接长度识别模型。此外,采用可加性解释模型 (shapley additive explanation, SHAP) 分析技术,探讨了不同声发射特征对模型预测结果的贡献,进一步揭示了 AE 特征与接头损伤模式之间的关联。研究结果为 CFRP/钢粘接接头的损伤监测和结构优化设计提供了重要理论支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本研究中的 CFRP/steel 粘接接头主要由钢板、碳纤维复合材料与粘合剂组成,接头的具体结构参数如图 1 所示。接头的主体部分由两块 Q235 钢板对接而成,中间插入 1 mm 的聚四氟乙烯薄膜以形成足够的间隙,接头的设计参考 ASTM D3528 试验标准进行。

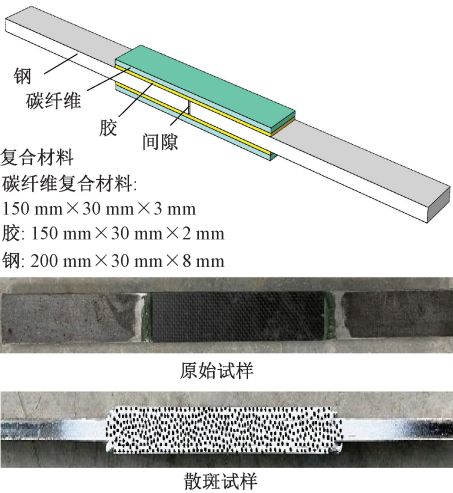


图 1 CFRP/steel 粘接接头几何尺寸

Fig. 1 Geometric dimensions of CFRP/steel bonded joint

复合材料的制备通过真空辅助树脂传递模塑 (vacuum assisted resin transfer molding, VARTM) 制成。CFRP 材料选用 T300 级预浸料碳纤维板,该类型材料广泛应用于石油化工、海洋平台和桥梁等结构部件中,铺层顺序为 $[0/90]_{2s}$ 。钢板采用 Q235 碳钢,代表常用工程结构钢种,在复合材料-金属结构连接中具有良好的代表性。聚四氟乙烯薄膜用于界面控制,是常见的隔离材料,可以确保粘接界面一致性。其中环氧树脂与环氧树脂固化剂的重量比为 2:1。该接头的制备首先利用 120 目的砂纸打磨层合板表面和钢板表面,随后,利用吹风机吹散试件表面的灰尘颗粒,然后用酒精棉擦拭试件表面 2~3 次。试件表面清洁后,利用涂胶工具将粘合剂均匀地涂在接头搭接区域上。然后利用刀片刮掉接头外多余的胶,避免出现胶层的尖角以产生应力集中。接头粘贴完成后,利用塑料袋进行包裹并利用夹具进行夹紧,然后在 1 巴压力的真空袋下进行固化。值得一提的是,本研究采用厚度为 2 mm 的硬塑料片控制接头的胶层厚度。首先将间隔片放置在粘接区域两侧,施加压力时,间隔片限制上下基材的相对距离,从而保证胶层厚度为 2 mm。接头各个组成成分的材料性能参数如表 1 所示。

表 1 接头组成成分的材料性能参数
Table 1 Material performance parameters of joint

参数	钢	CFRP	胶
弹性模量/Pa	2.1×10^{11}	2.3×10^{11}	1.5×10^9
屈服强度/Pa	2.35×10^8		
泊松比	0.3		
拉伸强度/Pa	3.75×10^8	3.53×10^9	4.2×10^7
延伸率/%	26	1.5	1.5

通过调研,本研究发现较短的搭接长度更容易发生界面剥离或脆性断裂,而较长的搭接长度则倾向于呈现更复杂的应力分布与损伤协同演化行为^[37-39]。此外,本研究还发现在工程实际应用中,如桥梁结构或者船体结构表面出现损伤时,常常需要 CFRP 板来进行粘接加固,加固的长度一般分布在 20~100 mm。因此,本文选择 25、50、75 和 100 mm 搭接长度的 CFRP/steel 粘接接头作为研究对象,这样既能符合工程实际,又可以涵盖不同失效模式的演化过程,有助于分析搭接长度对损伤行为的系统性影响。在本文,每类试件设计 5 个,以获得更加精确的实验结果。CFRP/steel 粘接接头的试样类别如表 2 所示。

此外,本研究粘接层厚度设置为 2 mm 主要有 2 个原因:1) 便于实验观察,这样的设计可以让本研究清晰地观察到 CFRP/steel 粘接接头在拉伸破坏中 DIC 散斑的运动过程;2) 便于更好地理解接头在拉伸载荷下的损伤演

表2 CFRP/steel 接头试样类别

Table 2 Categories of specimens for CFRP/steel joints

(mm)

编号	搭接长度	粘接厚度	CFRP 厚度
L25D3	25	2	3
L50D3	50	2	3
L75D3	75	2	3
L100D3	100	2	3

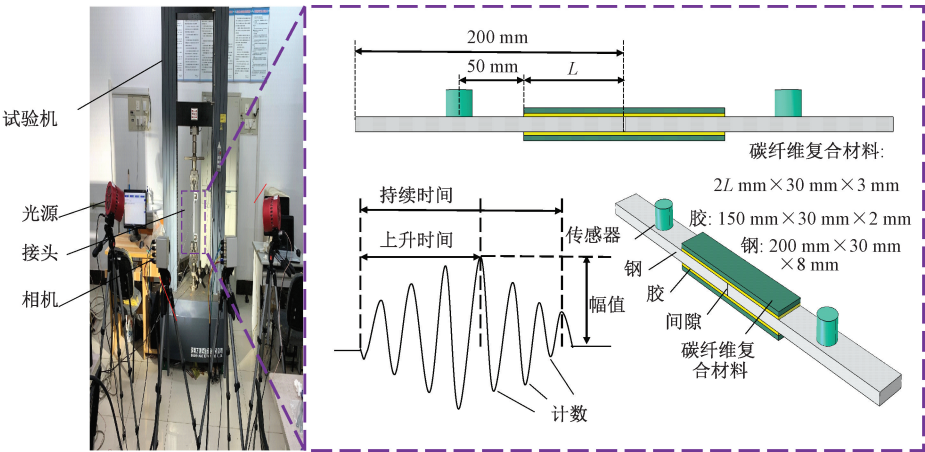


图2 CFRP/steel 粘接接头拉伸实验装置

Fig. 2 Tensile test device for CFRP/steel bonded joint

实验所用声发射系统为美国物理声学公司 (Physical Acoustics Corporation, PAC) 生产的 Sensor Highway II, 2 个 AE 传感器型号为 R15I-AST, 其灵敏频率范围为 80~200 kHz, 适用于识别复合材料中纤维断裂、基体破坏及界面剥离等典型声发射源。系统采样频率设置为 2.5 MHz, 可覆盖材料中高频微裂纹的瞬时信号; 模拟滤波器频率范围为 1 kHz~1 MHz, 触发阈值设置为 35 dB 以屏蔽环境噪声干扰。传感器布置于接头两端对称位置, 使用耦合剂固定, 并通过前放增益 40 dB 放大信号。为适配不同搭接长度导致的信号传播路径差异, 在预实验阶段对传感器距离与系统灵敏度进行了校正与优化, 确保所有试样下均可稳定采集有效声发射数据。声发射系统的具体配置如表 3 所示。

表3 声发射采集系统的参数配置

Table 3 Parameter configuration of the AE acquisition system

门槛/dB	频率范围/Hz	采样频率/Hz	增益/dB
35	$10^3 \sim 10^6$	2.5×10^6	40

实验所用的 3D-DIC 系统的型号为 PMLAB, 由南京中迅微传感技术有限公司生产。该系统用于同步采集接

化机制, 有一定厚度的胶层有助于本研究更好地观察到接头胶层的破坏情况以及界面损伤情况。

1.2 系统搭建

图 2 为 CFRP/steel 粘接接头拉伸的实验装置, 包括 DIC 应变测量系统、AE 监测系统和拉伸试验机。本次实验采用位移控制, 拉伸速率为 1 mm/min。拉伸试验机主要记录接头在加载过程产生的载荷和位移, DIC 系统用来捕捉接头粘接区域周围的应变, AE 监测系统主要用来记录接头在拉伸过程中产生的破坏信号。

头搭接区域的表面应变分布和变形, 该系统由 2 个 CMOS 工业相机组成, 最大分辨率为 2 304 pixels×1 720 pixels, 最大采集速率为 500 fps, 配套使用 DIC-3D-2020 软件进行图像处理与分析。拍摄窗口大小为 135 mm×256 mm, 可完整覆盖最大搭接长度样本区域。子集尺寸为 21 pixels×21 pixels, 步长为 7 pixels, 经预实验验证可在各搭接长度下识别明显应变集中区域和变形扩展趋势。此外, 采用对比度增强与灰度平滑算法处理图像数据, 进一步提高了应变识别精度与鲁棒性。上述参数均通过多组预实验进行设定与优化, 具有非常强的可靠性。

2 CFRP/steel 粘接接头拉伸损伤演化分析

2.1 CFRP/steel 粘接接头拉伸损伤 AE 信号分析

图 3(a)~(d) 分别显示了不同搭接长度接头的幅值-载荷-累计能量-时间关系图。

图 3 中, 圆形散点表示幅值-时间关系图, 圆形曲线表示载荷-时间关系图, 方形曲线表示累计能量-时间关系图。在本研究中, 接头的损伤过程可大致分为 3 个阶段, 分段依据为累计能量-时间曲线与载荷-时间曲线斜

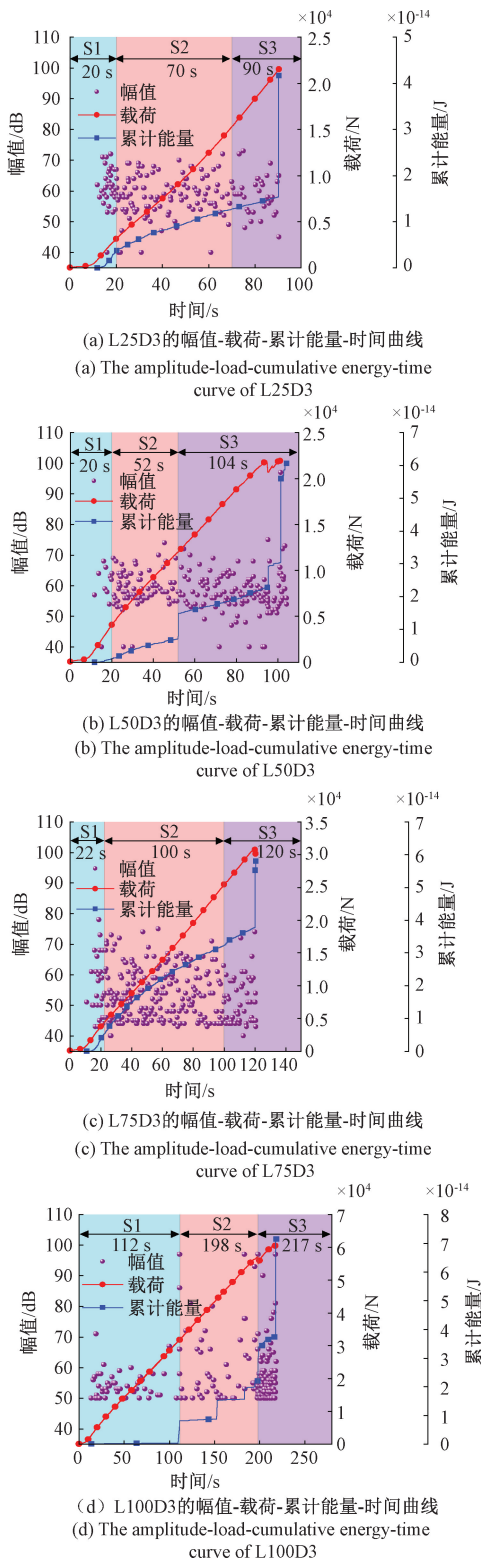


图 3 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度的幅值-载荷-累积能量-时间曲线

Fig. 3 The amplitude-load-cumulative energy-time curve of different overlap length of CFRP/steel bonded joints

率的变化,以及幅值信号密度和分布的突变。具体分析为:

第 1 阶段(S1):在接头承受初始拉伸载荷的阶段,由于接头承受初始拉伸载荷,接头会产生明显的位移波动,此时,接头在拉伸初始会产生一个高幅值 AE 信号,整个阶段的幅值主要集中在 40~75 dB。与此同时,累积能量-时间曲线和载荷-时间曲线急剧增长,表现出相似的增长趋势,但持续的时间较短,此阶段产生的 AE 信号主要是由钢的变形和接头内部裂纹的增长产生。

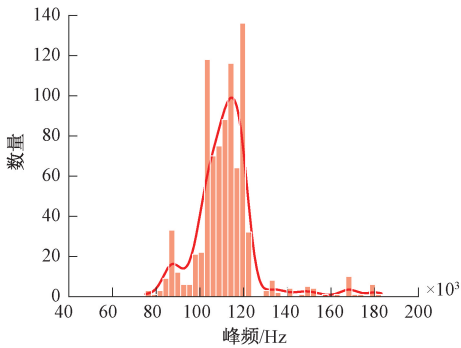
第 2 阶段(S2):接头进入稳定拉伸的阶段,损伤会逐渐形成。此时,幅值主要集中在 50~80 dB,累积能量-时间曲线相较于 S1 缓慢上升,斜率略有下降,但是载荷-时间曲线仍然保持着 S1 的速率稳步上升。在 S2,AE 信号明显变多。此时,试样的粘合层开始出现裂纹,并迅速扩展。同时,CFRP 中也出现了许多纤维断裂和基体开裂。

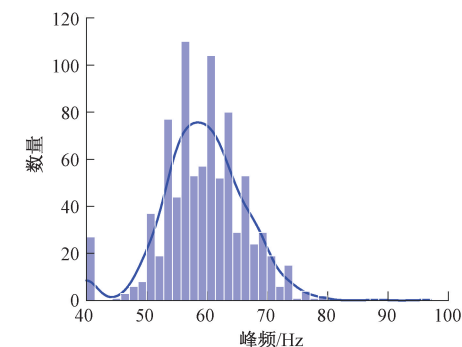
第 3 阶段(S3):在本阶段,出现许多高幅值 AE 信号,甚至出现高达 100 dB 的 AE 信号。此时,由于粘合剂层内部出现裂纹,导致粘合剂发生部分脱落。当粘合剂无法支撑 CFRP 和钢粘合在一起时,粘合剂在钢/粘合剂和 CFRP/粘合剂界面处发生断裂。然而,当搭接长度为 100 mm 时,与其他 3 种搭接长度拉伸过程不同的是,累积能量-时间曲线呈现阶梯式上升,AE 信号比较少,但是高幅值信号特别多。这可能是由于接头的粘接区域增大,每一次破坏都会产生高幅值 AE 信号导致的。

2.2 CFRP/steel 粘接接头拉伸损伤 AE 特征分布分析

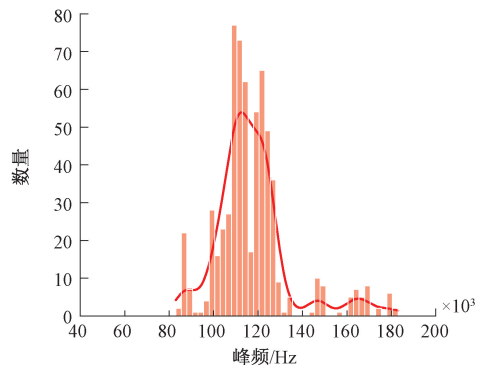
为深入探讨搭接长度对 AE 信号特征的影响,本文统计并绘制了 L25D3、L50D3、L75D3 和 L100D3 这 4 种不同搭接长度接头在拉伸过程中的 AE 峰值频率与幅值分布直方图,如图 4 所示。

从图 4(a)、(c)、(e)和(g)的峰频分布来看,随着搭接长度的增加,AE 信号的峰频集中区间逐渐变宽。对于搭接长度为 25 和 50 mm 的接头,峰频主要集中在 100~120 kHz,表明其在拉伸期间发生了基体开裂、粘结失效和内聚失效。而对于搭接长度为 75 mm 的接头,AE 信号的峰频主要集中于 100~140 kHz,信号频率分布变宽,表明结构破坏过程相对缓慢,界面和胶层经历了较长的

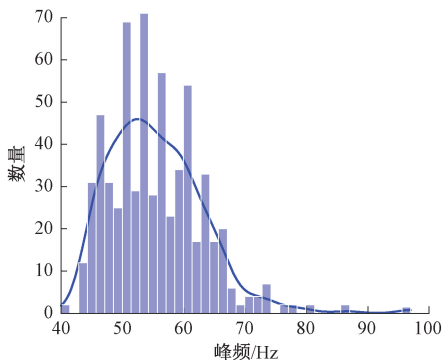




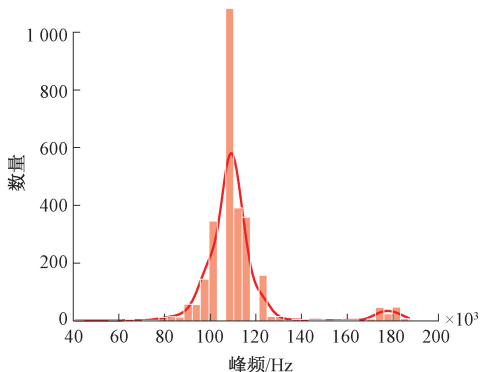
(b) L25D3的幅值分布
(b) Histogram of amplitude distribution of L25D3



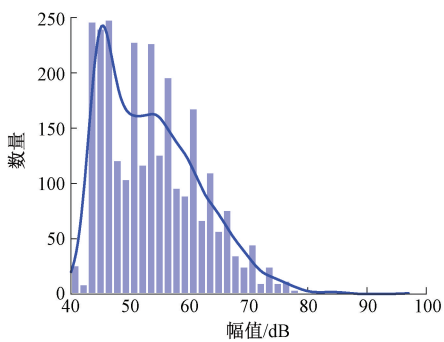
(c) L50D3的峰频分布
(c) Histogram of peak frequency distribution of L50D3



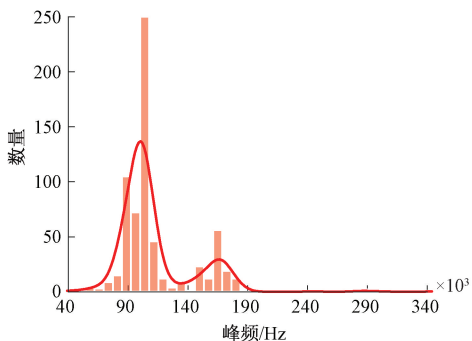
(d) L50D3的幅值分布
(d) Histogram of amplitude distribution of L50D3



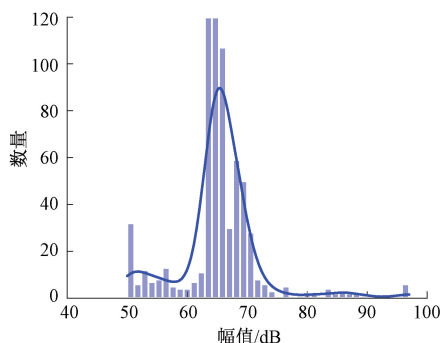
(e) L75D3的峰频分布
(e) Histogram of peak frequency distribution of L75D3



(f) L75D3的幅值分布
(f) Histogram of amplitude distribution of L75D3



(g) L100D3的峰频分布
(g) Histogram of peak frequency distribution of L100D3



(h) L100D3的幅值分布直方图
(h) Histogram of amplitude distribution of L100D3

图4 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度的峰频和幅值分布

Fig.4 Histogram distribution of peak frequency and amplitude of CFRP/steel bonded joints with different overlap lengths

应力传递过程,损伤形式以粘结失效和内聚失效为主。而对于搭接长度为 100 mm 的接头,AE 信号的峰频主要集中于 100~200 kHz,信号频率分布更宽,表明结构破坏过程更加缓慢,界面和胶层经历了更长的应力传递过程,损伤形式以粘结失效和内聚失效为主。

从图 4(b)、(d)、(f)和(h)中的幅值分布来看,不同搭接长度下的 AE 幅值有明显差异。L25D3 和 L50D3 试样中 AE 幅值集中于 40~75 dB,反映其破坏过程中以低幅值、多次重复的损伤积累为主。L75D3

和 L100D3 试样中 AE 幅值集中于 45~90 dB,说明其在拉伸期间发生了纤维断裂和界面脱粘。总体而言,长搭接长度试样更容易产生高频、高幅值 AE 事件,说明其损伤模式以突发性破坏为主,而短搭接试样则呈现出频率低、幅值小的信号特征,体现了其损伤演化的渐进性与多阶段性。

2.3 CFRP/steel 粘接接头拉伸 DIC 信号分析

图 5(a)~(d) 分别显示了不同搭接长度接头拉伸的载荷-位移曲线、DIC 应变的损伤演化结果与接头拉伸的损伤形貌图。

在载荷-位移曲线上选取 A、B、C 和 D 这 4 个点,并选取相应位置的应变场进行分析。从图 5 中可以看出,

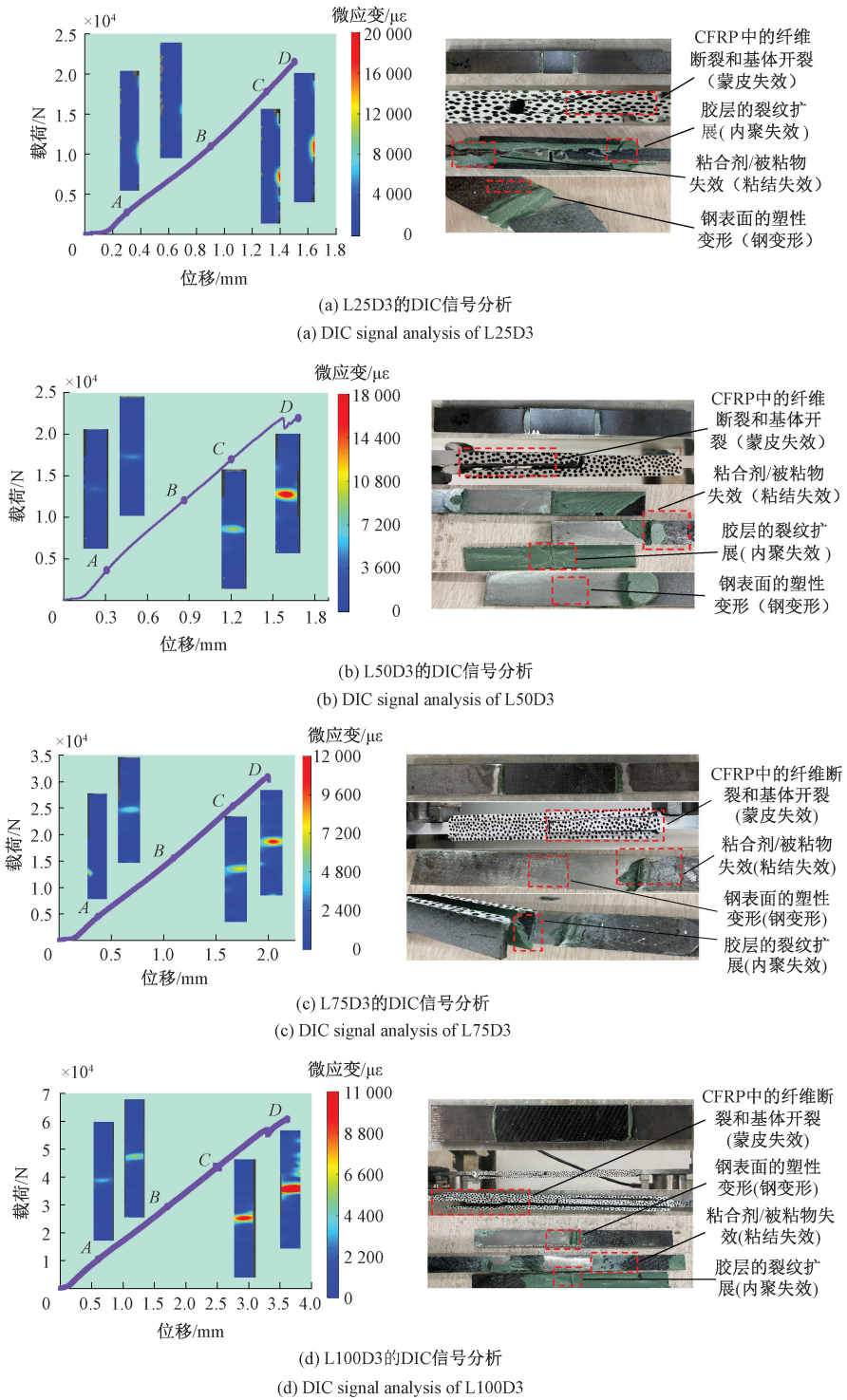


图 5 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度的 DIC 信号分析

Fig. 5 DIC signal analysis of different overlap lengths of CFRP/steel bonded joints

CFRP/steel 粘接接头的应变损伤演化过程大致可分为3个阶段,分别为线弹性阶段(初始加载阶段)、非线性阶段(中期加载阶段)和破坏阶段(后期加载阶段)。在线弹性阶段,应变随载荷线性增加,分布较为均匀。在非线弹性阶段,搭接区域边缘开始出现应力集中,应变逐渐增大。当搭接长度较短时,边缘的应变增长更快,出现局部失效迹象。当搭接长度较长时,应变分布相对均匀,接头中央区域的应变相对边缘区域更加集中。在破坏阶段,搭接区域的应变达到峰值,接头的胶层内部发生严重的破坏。当搭接长度较短时,应变集中区域迅速扩展,导致快速失效。当搭接长度较长时,应变分布更加分散,破坏相对延迟。

在图5(a)中,当接头变形为0.3 mm(A点)时,DIC应变分布较均匀,粘合层仅出现微小裂纹,声发射信号幅值较低,表明此时接头处于弹性变形阶段。当变形达到0.9 mm(B点)时,粘接区域的应力集中较为显著,尤其是在搭接边缘位置,应变较高。此时声发射信号幅值较高且累积能量-时间曲线斜率激增,表明粘合层边缘发生了破坏,CFRP出现了基体开裂。当变形达到1.3 mm(C点)时,DIC应变迅速升高,胶层碎片不断脱落,声发射信号密集且幅值高,释放的断裂能量转化为动能,导致胶层内部发生内聚破坏。当变形达到1.5 mm(D点)时,应变集中更加明显,损伤沿着粘接边缘不断传播,导致粘合层与CFRP分离,出现粘结失效。通过实验观察和应变场分布特征的对比,内聚破坏表现为胶层内的高应变集中区域,而粘结破坏表现为界面上的应变突变。从破坏后的试样观察,胶层内部出现大量裂纹和孔洞,搭接区域CFRP出现基体开裂、纤维断裂和分层现象,钢基体表面发生了轻微的塑性变形。

在图5(b)中,在A点(0.3 mm)时,接头搭接区域的应变集中现象较明显,相较于搭接长度为25 mm的CFRP/steel粘接接头,应变分布表现的更加均匀。声发射信号集中在40~75 dB,表明CFRP开始发生轻微的基体开裂。在B点(0.9 mm)时,DIC应变集中区域扩大,声发射信号比较密集,表明胶层发生了内聚破坏。在C点(1.2 mm)时,DIC应变集中现象更加明显,声发射信号幅值显著增加,表明接头发生了严重的粘结破坏。在D点(1.7 mm)时,胶层不断脱落,胶层的强度难以支撑CFRP和钢继续粘接在一起,导致接头发生严重失效。从接头拉伸后的损伤形貌可以看出,接头发生了CFRP破坏、钢变形、内聚破坏和粘结破坏。

在图5(c)中,选择载荷-位移曲线的4种状态来引入接头的渐进损伤。从图5(c)中可以看出,由于增大了搭接长度,接头的粘合区域变大,使得接头的极限拉伸载荷和拉伸强度也变大。相较于搭接长度为50 mm的情况,当接头变形为0.4 mm(A点)时,接头开始发生损伤,

比前者发生的时间稍慢。当接头变形为1.2 mm(B点)时,此时接头的粘合层开始脱落,CFRP也开始出现基体开裂,这个现象可以从B点的应变状态观察到。从B点的应变状态可以看出,此时应变有向粘接区域集中的趋势,但不是特别地明显,说明此时接头的损伤不是很严重。然而,当接头变形为1.8 mm(C点)时,接头的拉伸载荷也接近25 kN,此时应变集中在接头粘合区域,出现了粘结破坏和内聚破坏。当接头变形为2 mm(D点)时,接头发生了完全失效,接头失效载荷达到了30.87 kN。选择破坏后的接头进行分析,可以发现接头的CFRP破坏呈“H”字型,但胶层的破坏较第1种情况断裂比较平整,胶层表面比较光滑,没有过多的裂纹和孔洞,并且钢表面的变形也没有第1种情况严重。

在图5(d)中,在接头的载荷-位移曲线选择A、B、C和D这4个点,分别对应着拉伸位移为0.6、1.7、2.4和3.6 mm。当拉伸位移为0.6 mm(A点)时,接头的搭接区域出现了应变集中,说明接头搭接处的胶层发生了脱落和破坏。当拉伸位移达到1.7 mm(B点)时,胶层的应变集中现象非常明显,在搭接区域的整个中央都出现了较严重的损伤。当拉伸位移达到2.4 mm(C点)时,此时声发射幅值信号急剧升高,说明此时胶层发生了粘结破坏和内聚破坏。当接头拉伸位移为3.6 mm(D点)时,接头达到了最大拉伸载荷,该载荷比前3种搭接长度的都要大,大约是搭接长度为75 mm载荷的2倍。收集拉伸后的试样,发现出现很多胶层碎片,在接头表面观察到十分严重的内聚破坏和粘结破坏,而且CFRP破坏呈“H”字型,破坏比较严重。但是,在钢表面没有观察到较大的塑性变形,说明CFRP对钢起到了很好的保护作用。

综上所述,当CFRP/steel粘接接头的搭接长度设置为25 mm时,粘接区域的应变集中表现较为显著,尤其是在接头的搭接边缘位置,应变较高。随着搭接长度的增加,粘接区域的应变分布趋于均匀,接头边缘应变集中现象减弱。应变随着搭接长度的增加逐渐减小,这是因为单位面积上的载荷降低,粘接界面能够更均匀地分散载荷。并且随着加载的进行,接头的主要损伤模式为CFRP破坏、钢变形、内聚破坏和粘结破坏。

2.4 不同搭接长度接头的载荷与位移统计分析

本研究在每种搭接长度条件下均进行了5组试验,所有试样均在相同温度和湿度条件下进行制备和测试。样品制备均采用统一的表面处理流程与夹具加载程序,确保加载速率及胶层厚度一致,提升实验一致性。试验数据在同一条件下的波动范围控制在 $\pm 5\%$,具备良好重复性。为了探讨搭接长度对CFRP/steel粘接接头力学性能的影响,本文对不同搭接长度下接头的最终失效载荷和平均位移进行了统计分析,结果如表4和5所示。

表 4 不同接头的失效载荷

Table 4 Failure loads of different joints

编号	最终失效载荷/ 10^3 N					平均载荷 / 10^3 N	标准差
	1	2	3	4	5		
L25D3	21.52	21.37	21.65	21.70	21.51	21.55	0.13
L50D3	21.95	21.85	22.50	21.73	21.78	21.96	0.31
L75D3	30.87	30.09	30.63	30.66	30.44	30.54	0.29
L100D3	60.70	60.93	62.41	60.54	62.48	61.41	0.95

表 5 不同接头的最大位移

Table 5 Maximum displacements of different joints

编号	最大位移/mm					平均位移 /mm	标准差
	1	2	3	4	5		
L25D3	1.50	1.55	1.47	1.55	1.47	1.51	0.04
L50D3	1.70	1.68	1.72	1.70	1.65	1.69	0.03
L75D3	2.00	2.04	2.00	1.97	2.06	2.01	0.04
L100D3	3.60	3.53	3.58	3.68	3.66	3.61	0.06

从表 4 中最终失效载荷数据来看,搭接长度的增加显著提升了接头的承载能力。其中,L25D3 和 L50D3 样本的平均最终失效载荷分别为 21.55 和 21.96 kN,仅有小幅差异,表明在较短搭接区域内承载性能的提升有限。而当搭接长度增加至 75 mm 时,失效载荷显著上升至 30.54 kN,增幅达到 39%。进一步将搭接长度增加至 100 mm 后,接头的平均失效载荷达到 61.41 kN,是 L75D3 的 2 倍以上,显示出搭接长度在超过某一临界值后,对载荷传递能力的增强效应更为显著。

从表 5 中平均失效位移数据来看,较长的搭接长度不仅增强了承载能力,也提升了接头的延展性与破坏缓冲能力。其中,L25D3 和 L50D3 的平均位移分别为 1.51 和 1.69 mm,变化幅度较小。而 L75D3 样本的平均位移达到 2.01 mm,L100D3 更是显著上升至 3.61 mm,是 L25D3 的 2.4 倍,说明搭接长度越长,破坏过程越平稳,具有更好的延性表现。

综合载荷与位移指标,表明搭接长度的增加有助于减缓应力集中、延缓裂纹扩展,提升了接头的承载能力与韧性水平,为工程结构中粘接区的设计提供了可靠的参数优化依据。

2.5 CFRP/steel 粘接接头 AE 与 DIC 关联分析

从前面的分析中可以看出,无论是 AE 分析还是 DIC 分析,都不能完全获得接头的损伤信息。因此,为了弥补单一方法的不足,本研究采用 AE 和 DIC 方法来描述接头损伤过程。一般来说,声发射的累计能量可以观察到接头加载过程中每个阶段的损伤变化。此外,应变信息

可以确定接头的严重程度和损伤演化。

为进一步揭示 CFRP/steel 粘接接头的声发射信号与应变演化之间的关系,本研究对不同搭接长度的接头绘制了累计能量-应变-位移变化曲线,并在 DIC 应变曲线上的 A、B、C 和 D 点提取了对应的 DIC 应变云图,以实现损伤过程的 AE-DIC 关联分析。此外,为了更加直观地观察到接头损伤前后的变化,还在图 6 中添加了接头损伤前和损伤后的原始图像。图 6 显示了不同搭接长度的 CFRP/steel 粘接接头在拉伸载荷下的累计能量-应变-位移关系曲线。

从图 6 中可以看出,声发射的累计能量和 DIC 的应变随位移的增加逐渐增加,在加载前期比较平稳,在加载中期比较快速,到了加载后期,累计能量和 DIC 应变突增,标志着接头完全发生失效。

从图 6 中还可以看出,在 A 点,AE 的累计能量曲线和 DIC 应变曲线增长缓慢,DIC 应变场分布比较均匀,结构整体处于弹性响应阶段;当位移达到 B 点时,AE 的累计能量曲线和 DIC 的应变曲线开始逐渐上升,对应的 DIC 图像出现明显应变集中区,主要分布在接头搭接边缘区域,说明此时接头内部粘接界面产生初期滑移和微裂纹。到了 C 点,累计能量-位移和应变-位移曲线增长速度变快,损伤产生了一定的积累,胶层碎片不断脱落,导致胶层内部发生严重的内聚破坏。到了 D 点后,AE 的累计能量和 DIC 应变迅速增加,形成一条陡峭的上升段,表明结构内部发生了剧烈的能量释放过程,接头的损伤程度达到了最大值。此时 DIC 图中应变集中区域显著扩大,损伤由接头搭接边缘位置向中心位置传播,综合 AE 与 DIC 的结果,此时接头粘接界面发生了严重剥离,导致出现粘结失效。

对于 L25D3 和 L50D3,损伤呈突发性发展,AE 累计能量快速上升,DIC 应变上升速度较快。损伤以粘结失效为主,可能伴随局部基体断裂。DIC 图像中应变带分布集中、扩展速度快。对于 L75D3 和 L100D3,损伤演化呈渐进式,AE 能量释放速率低但持续时间长,应变上升速度缓慢。损伤以胶层内聚破坏和粘结破坏为主。DIC 应变图像中高应变区逐渐扩散,应变带宽度增加但强度较低。

综合前面的 AE 与 DIC 分析可知,搭接长度对 CFRP/steel 粘接接头的损伤起始机制、扩展路径与最终失效模式具有显著影响。对于 L25D3 与 L50D3,由于载荷集中传递,界面应力梯度大,易产生粘结破坏和基体开裂;而对于 L75D3 和 L100D3,接头表现出应力分布均匀、损伤演化渐进、声发射事件分散且能量释放缓慢的特征,损伤模式以内聚破坏和粘结破坏为主。此外,DIC 应变场结果与 AE 信号在多个阶段高度一致,反映出不同搭接结构在力学响应与损伤过程上的演化规律。

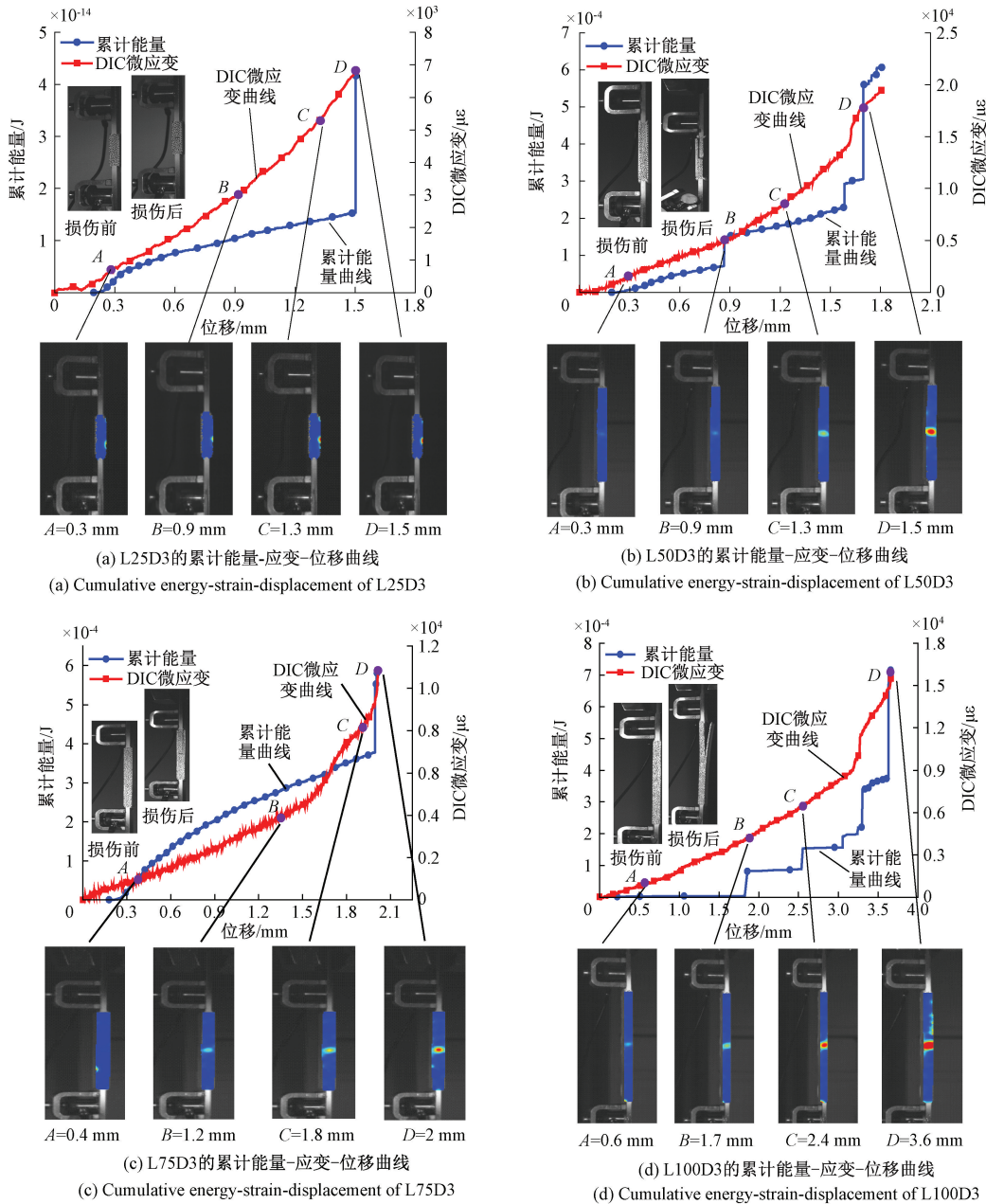


图6 不同接头的累计能量-应变-位移曲线
Fig. 6 Cumulative energy-strain-displacement of different joints

2.6 Goland-Reissner 模型

为进一步理解不同搭接长度对 CFRP/steel 双搭接粘接接头损伤演化行为的影响,本文结合典型粘接接头理论模型,从胶层剪应力分布与破坏机理角度进行了分析。

在经典的粘接接头分析中,剪切滞后模型(Volkersen 模型)是最早用于描述搭接接头中胶层剪应力分布的理论模型之一。其基本假设是仅考虑胶层沿长度方向的剪应力传递,忽略剥离应力的影响。然而,当界面模量差异

显著时,仅考虑剪应力不足以全面描述损伤行为。Goland 与 Reissner 在分析粘接接头时考虑了弯矩引起的剥离应力,是对 Volkersen 模型的一个拓展和改进^[40]。另外,本文研究的是 CFRP/steel 粘接接头,G-R 模型更适用于解释本研究中接头所引发的粘结破坏和内聚破坏现象。粘合层的剪应力分布如式(1)所示。

$$\tau = -\frac{1}{8} \frac{\bar{P}}{c} \left\{ \frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh(\beta c/t) (x/c)}{\sinh(\beta c/t)} + 3(1 - k) \right\} \quad (1)$$

其中, \bar{P} 是每单位宽度施加的拉伸载荷, c 是搭接长度的一半, t 是被粘物厚度, k 是弯矩系数。

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)} \quad (2)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{P}}{tE}} \quad (3)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (4)$$

其中, G_a 和 t_a 分别是接头的剪切模量和粘合层的厚度, ν 是泊松比。粘合剂剥离应力 σ 如式(5)所示。

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} \frac{\bar{P}t}{c^2} [A + B] \quad (5)$$

$$A = \left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (6)$$

$$B = \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (7)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\bar{P}}{tE} \quad (8)$$

$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (9)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (11)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (12)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (13)$$

从 G-R 理论模型中可以看出, 剥离应力在搭接端部最强, 是潜在的起始损伤区域, 也就是本文识别到的粘结破坏。剪应力沿搭接长度非均匀分布, 搭接长度对其影响显著。搭接长度越短, 剥离应力集中效应越强, 更易导致粘结破坏。随着搭接长度的增加, 应力进行重新分布, 易引发 CFRP 破坏或钢的变形, 这与上文中图 3~6 搭接长度对 CFRP/steel 粘接接头损伤行为的影响规律相符。

3 CFRP/steel 粘接接头搭接长度识别模型

基于第 2 章对不同搭接长度下 CFRP/steel 粘接接头在拉伸载荷下的损伤演化特征的系统分析, 发现搭接长度对接头的失效模式和损伤行为具有显著影响。此外, 通过深入分析 CFRP/steel 粘接接头在拉伸载荷下的 AE 信号和 DIC 应变, 反映了接头在加载过程中的复杂响应过程。为了进一步实现对搭接长度的快速识别与智能分类, 并深入挖掘声发射特征与结构参数之间的关联性, 在

此基础上构建了基于 XGBoost 的搭接长度识别模型, 并利用 SHAP 方法对其决策机制进行了解释性分析。本节将详细介绍模型的构建流程、特征选择过程以及模型性能评估结果。

3.1 实验方法

1) XGBoost 算法

XGBoost 是对 He 等^[41]提出的梯度增强决策树算法的改进, 它集成了多个可用于回归和分类任务的弱学习模型。XGBoost 的具体步骤^[42]为:

给定一个观测值 n , 每个观测值含有 m 个特征和一个变量 p 的数据集 $D = \{\mathbf{x}_i, p_i\}_{i=1}^n$, XGBoost 的目标函数 \hat{p}_i 如式(14)所示。

$$\hat{p}_i = \phi(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K f_k(\mathbf{x}_i), \quad f_k \in F \quad (14)$$

其中, \mathbf{x}_i 是输入特征向量, p_i 是预测为 \hat{p}_i 的实际目标值, f_k 表示一颗决策树, $f_k(\mathbf{x}_i)$ 表示第 k 棵树赋予第 i 个观测值的分数。

XGBoost 的目标函数 $Obj(\phi)$ 有 2 个组成部分。第 1 个组成部分为训练误差项, 如式(15)所示。

$$Obj(\phi) = \sum_{i=1}^n L(p_i, \hat{p}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (15)$$

其中, L 是测量 \hat{p}_i 和 p_i 之间误差的可微损失函数, $\Omega(f_k)$ 则为第 2 个组成部分, 如式(16)所示。

$$\Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T \mathbf{w}_j^2 \quad (16)$$

其中, γ 表示每个叶子的复杂度, λ 为控制惩罚项中 \mathbf{w}_j 的参数, \mathbf{w}_j 是每个叶子的分数向量。

XGBoost 中回归和分类的数学原理之间的区别仅在于损失函数的选择^[43]。模型第 t 次迭代得到的预测值如式(17)所示。

$$\hat{p}_i^{(t)} = \hat{p}_i^{(t-1)} + f_t(\mathbf{x}_i), \quad k = 1, 2, \dots, t \quad (17)$$

因此, 第 t 次迭代的目标函数如式(18)所示。

$$Obj^{(t)} = \sum_{i=1}^n L(p_i, \hat{p}_i^{(t-1)} + f_t(\mathbf{x}_i)) + \sum_{k=1}^t \Omega(f_k) \quad (18)$$

利用二阶泰勒公式, 目标函数的结果如式(19)所示。

$$\sum_{i=1}^n \left[L(p_i, \hat{p}_i^{(t-1)}) + g_i w_{q(\mathbf{x}_i)} + \frac{1}{2} h_i w_{q(\mathbf{x}_i)}^2 \right] + \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T \mathbf{w}_j^2 + C \quad (19)$$

XGBoos 算法通过最小化目标函数优化预测值^[44]。因此, 常数项 C 、 $L(p_i, \hat{p}_i^{(t-1)})$ 和 γT 可以从式(19)中排除。将 I_j 视为第 j 叶节点所有数据点的表示, 目标函数可以由式(20)确定, 即:

$$Obj^{(t)} \approx \sum_{j=1}^T \left[\sum_{i \in I_j} g_i \mathbf{w}_j + \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda \right) \mathbf{w}_j^2 \right] \quad (20)$$

事实上,要考虑每个潜在的树结构通常是不切实际的,而 XGBoost 利用了一种贪婪算法,该算法从单个叶子开始,逐步添加分支来构建树。 I 是当前节点中可用观测数据的序列, $I=I_L \cup I_R$,其中 I_L 和 I_R 分别是由分割产生的左节点和右节点的实例集,分割后的目标函数如式(21)所示。

$$Obj_{split} = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\sum_{i \in I_L} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I_L} h_i + \lambda} + \frac{\left(\sum_{i \in I_R} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I_R} h_i + \lambda} - \frac{\left(\sum_{i \in I} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] + \gamma T$$

(21)

2) SHAP 理论

SHAP 基于博弈论中的 Shapley 值原理,是一种有效阐释机器学习模型预测过程和特征重要性的方法^[45]。SHAP 值衡量每个输入特征对模型预测值的贡献,揭示了解释变量与被解释变量之间的阈值及其交互协同效应^[46]。SHAP 基于简化的局部精确模型(二元变量的线性组合)提供解释,假设 g 是解释函数, ϕ 为每个特征的 Shapley 值, z' 是简化的二元特征子集,因此 $z' \in \{0,1\}^M$, M 是简化特征的个数,则这种解释模型的定义^[47] 如式(22)所示

$$g(z') = \phi_0 + \sum_{i=1}^M \phi_i z'_i$$

(22)

其中, ϕ_0 是所有训练样本的预测均值, ϕ_i 是解释模型中的系数,表示第 i 个特征对模型预测的归因值。特征 i 的 Shapley 值 ϕ_i 由式(23)给出,即:

$$\phi_i(f, \mathbf{x}) = \sum_{z' \in \mathbf{z}'} \frac{|z'|! (M - |z'| - 1)!}{M!} [f_x(z') - f_x(z' \setminus i)]$$

(23)

其中, $f_x(z') - f_x(z' \setminus i)$ 为特征 i 加入子集 z' 时的边际贡献。SHAP 值可以理解模型在所有特征取其平均值时的预测值与实际预测值之差^[48],当 SHAP 值为正值

时,说明该特征有利于模型预测结果;反之则会降低预测的准确度。SHAP 用于在特定运行场景下对训练数据库中的每个特征进行效果归因^[49]。因此,SHAP 能够提供运行场景的局部解释和全局解释。

3.2 特征选择

本研究基于声发射数据开发 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度识别模型,共选择了 9 种特征,分别是上升时间(rise time, RT)、计数(counts, C)、能量(energy, E)、持续时间(duration, D)、幅值(amplitude, Amp)、平均频率(average frequency, AF)、有效值电压(root mean square, RMS)、质心频率(centroid frequency, CF)和峰值频率(peak frequency, PF)。

本研究选取的 9 个典型声发射特征参数涵盖了时域与频域两类信息,能够全面反映损伤事件的时序行为、能量释放及频率分布特征。时域参数用于评估损伤强度与过程持续性,频域参数有助于区分不同损伤机制。在上述 9 个参数中,时域特征有 6 个,分别是 RT、C、E、D、Amp 与 RMS,频域特征有 3 个,分别是 AF、CF 和 PF。此外,上述特征已经被众多研究者所认可和广泛接受^[25,50-52]。图 7 为 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度数据集声发射特征的相关矩阵,系数 ρ 的范围为 $-1 \sim 1$ 。其中 ρ 值越接近 1,则代表两个声发射特征之间的正相关性越强; ρ 值接近 -1 ,则代表两个声发射特征之间的负相关性越强; ρ 值越接近 0,则代表两个声发射特征之间的相关性越弱。在评估声发射特征之间的关系时,能量和计数之间的正相关性最强,系数为 0.97。虽然相关矩阵提供了每个声发射特征的影响程度,但必须注意的是,这些值可能会根据所使用的数据集而显著不同。后文使用 SHAP 方法更全面地理解特征的重要性。

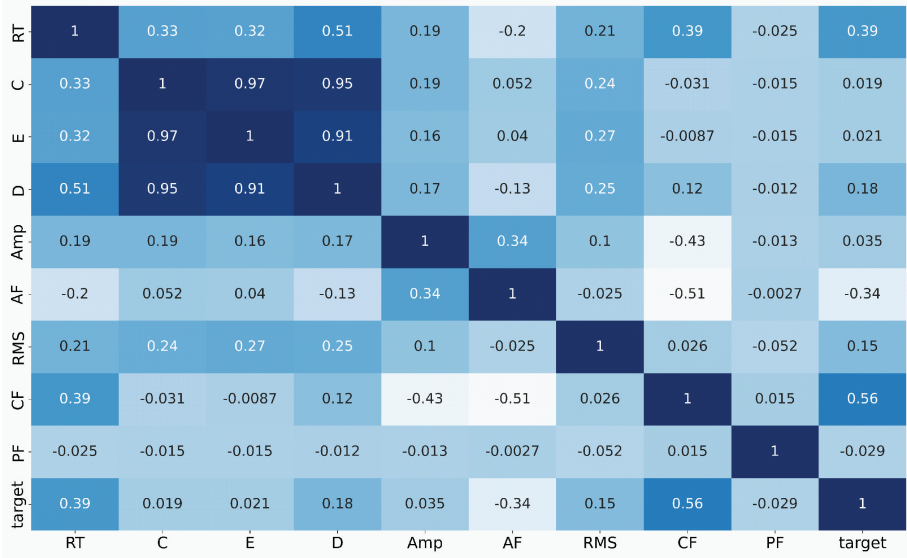


图 7 CFRP/steel 粘接接头声发射特征相关矩阵

Fig. 7 Correlation matrix of AE features for CFRP/steel bonded joints

3.3 模型构建与训练流程

本文采用 4 种广泛使用的机器学习 (machine learning, ML) 模型对 CFRP/steel 粘接接头的搭接长度进行识别, 分别是决策树 (decision tree, DT)、随机森林 (random forest, RF)、自适应提升算法 (adaptive boosting, Adaboost) 和极限梯度提升算法 (extreme gradient boosting, XGBoost)。为了系统评估并筛选最优模型, 首先通过对比不同模型的性能指标, 综合考虑精度、稳定性和训练效率, 逐步构建出最优的识别模型。此外, 为进一步提升模型的可解释性, 本文引入 SHAP 理论, 从特征重要性角度分析 AE 信号中各特征对模型预测性能的贡献程度。

本实验总共采集 5 007 个声发射信号, 其中 L25D3、L50D3、L75D3 和 L100D3 的声发射信号数量分别为 863、634、2 829 和 681。图 8 为 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度数据。

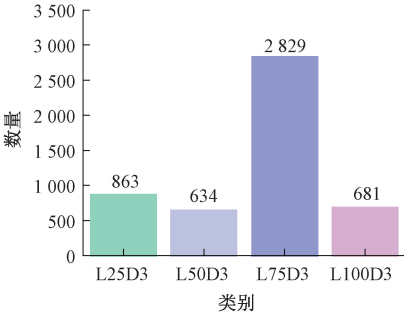


图 8 CFRP/steel 粘接接头数据集

Fig. 8 Dataset of CFRP/steel bonded joint

模型开发的工作流程如图 9 所示。所有模型均在针对 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度的实验数据集上进行训练和测试, 其中训练集与测试集的比例为 8:2。

为确保模型训练过程的稳定性及评估结果的可靠性, 采用十折交叉验证的方法进行模型调参与训练。具体而言, 将数据集随机划分为 10 个大小相等的子集, 每轮选取其中 1 个子集作为验证集, 其余 9 个用于训练, 如图 10 所示。

整个过程重复 10 次, 保证每个子集均作为验证集使用一次, 最终取各轮交叉验证平均性能指标作为综合评价标准。本研究采用网格搜索结合十折交叉验证的方式对 XGBoost 的主要超参数进行优化, 参数范围包括学习率、最大深度、树的数量、增强器和评估矩阵等。最终选择的最优参数组合为: 学习率 = 0.1, 最大深度 = 4, 树的数量 = 100, 增强器为梯度提升树, 评估矩阵为多分类对数损失。表 6 描述了每种模型在交叉验证过程中得到的最佳超参数组合。这些参数的选择对模型最终性能影响显著, 是优化过程的重要一环。

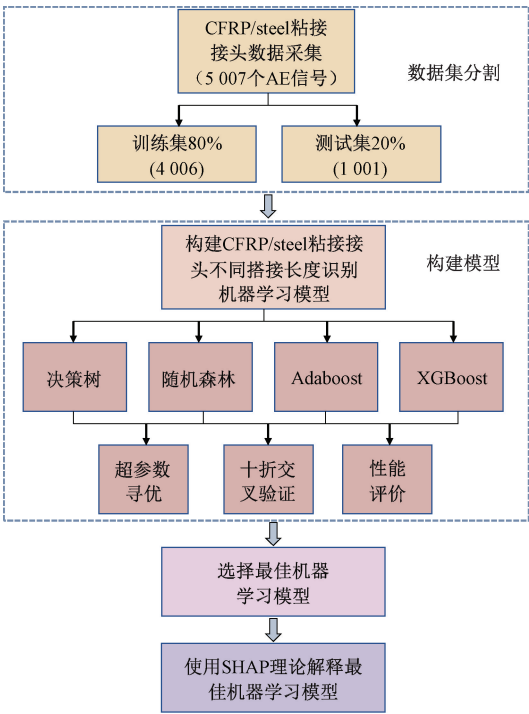


图 9 机器学习模型的构建流程

Fig. 9 Flowchart of the ML model construction

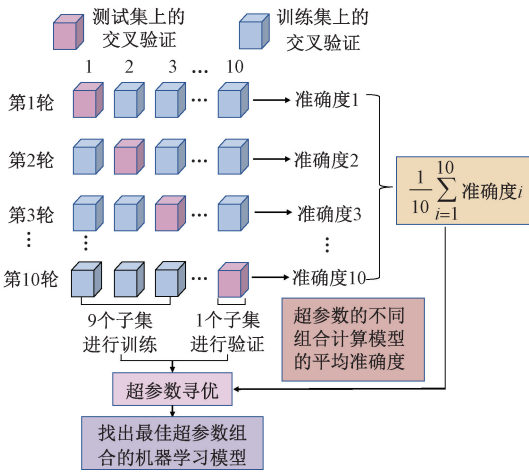


图 10 机器学习模型的十折交叉验证示意图

Fig. 10 Schematic of ten-fold cross-validation for the ML model

3.4 最优模型的验证与结果分析

完成模型训练后, 本研究对 4 种模型的预测性能进行了系统评估与对比, 评估方式包括混淆矩阵分析以及 4 项主流分类性能指标: 准确率、精确度、召回率和 F1 分数。图 11(a) ~ (d) 展示了十折交叉验证中 XGBoost 模型在每一折的各项指标值, 其在各折之间波动较小, 说明模型具有良好的稳定性与泛化能力。具体而言, 该模型的平均准确率为 93.15%, 平均精确度为 93.36%, 平均召

表 6 机器学习模型的最佳超参数
Table 6 Best hyperparameters for the ML models

模型	超参数	值
决策树	准则	熵
	最大深度	11
	最大特征	无
	最小样本叶子数	1
	最小样本分割数	2
随机森林	最大深度	无
	最大特征	平方根
	最小样本叶子数	1
	最小样本分割数	2
	树的数量	50
自适应提升算法	随机种子	12
	学习率	0.1
	树的数量	150
极限梯度提升算法	随机种子	42
	学习率	0.1
	最大深度	4
	树的数量	100
	增强器	梯度提升树
	评估矩阵	多分类对数损失

回率为 93.15%,平均 F1 分数为 93.06%,进一步验证了该算法的泛化能力。

为了更加直观地对比 4 种模型的分类性能,图 12(a)~(d)还展示了决策树、随机森林、自适应提升和极限梯度提升模模型的混淆矩阵,从图 12 中可观察到每个模型在各类别的预测表现。4 种模型的总体准确率分别为 89%、93%、81% 和 94%,其中 XGBoost 模型表现最为出色,在多分类识别任务中展现出更高的识别精度与更强的误差容忍能力。

如图 13 所示,进一步展示了 XGBoost 模型在不同搭接长度类别下的各项性能指标,包括精确度、召回率和 F1 分数。从图 13 中可以看出,尽管整体性能较高,但在 L50D3 这一类上的召回率明显偏低,仅为 0.78,远低于其他类别。这表明该模型在识别 L50D3 样本时存在一定的漏判倾向。为了解释这一现象,后续使用 SHAP 方法从特征重要性角度出发,分析模型对不同搭接长度 CFRP/steel 粘接接头的预测机制与特征贡献,进而指导未来模型结构优化与特征工程的改进方向。

综上所述,XGBoost 模型在本研究中展现出较高的识别精度、具有良好的稳定性和较强的泛化能力,适合作为 CFRP/steel 粘接接头搭接长度识别任务的核心工具。

3.5 CFRP/steel 粘接接头损伤机制的 SHAP 分析

尽管 XGBoost 模型在识别不同搭接长度的 CFRP/steel 粘接接头上具有出色的性能,但其在结构工程中的

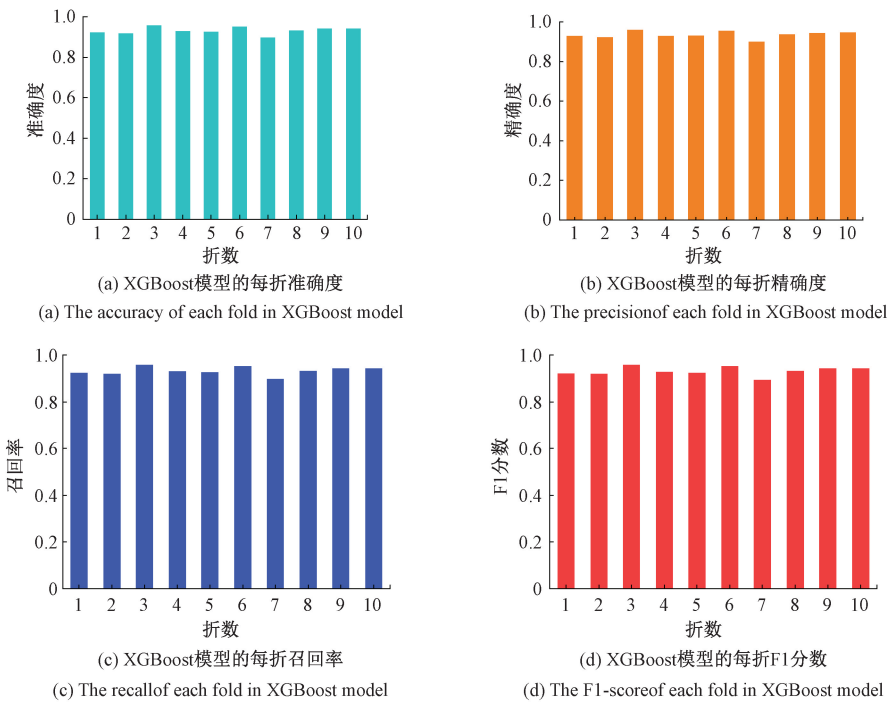


图 11 XGBoost 模型的十折交叉验证结果

Fig. 11 The ten-fold cross-validation results of XGBoost model

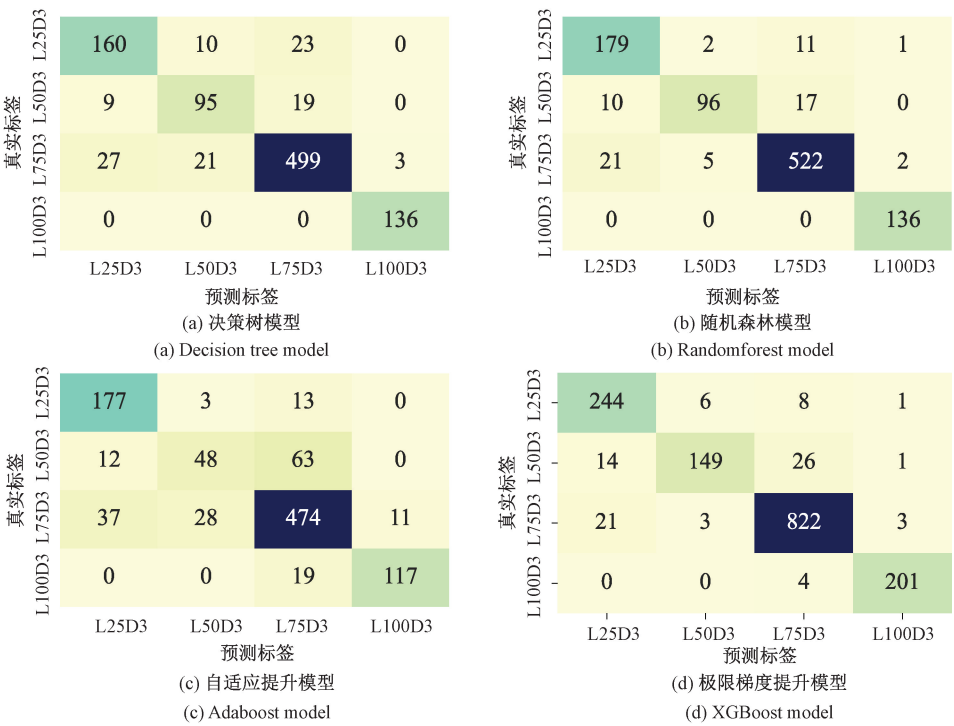


图 12 4 种不同机器学习模型的混淆矩阵

Fig. 12 Confusion matrix of four different ML models

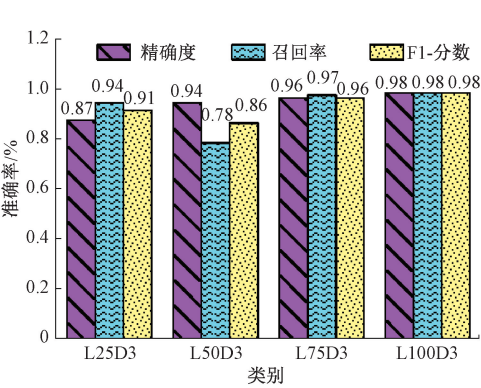


图 13 XGBoost 模型在不同类别上性能指标的比较

Fig. 13 Comparison of performance metrics of the XGBoost model across different categories

应用有时受到其“黑匣子”性质的限制,从而模糊了模型的可解释性。为了缓解这个问题,采用 SHAP 方法来阐明 XGBoost 模型的结果。此外,还对特征重要性进行了分析,为实现接头的最佳设计提供了宝贵的见解。SHAP 模型应用步骤如图 14 所示^[47-49]。

第 1 步:先训练一个可解释的机器学习模型。在开始 SHAP 解释之前,需要先训练一个机器学习模型,本文中最终选择的模型是 XGBoost 模型;

第 2 步:选择合适的 SHAP 解释器。根据模型类型选择合适的 SHAP 解释器,对于本文使用的 XGBoost 模

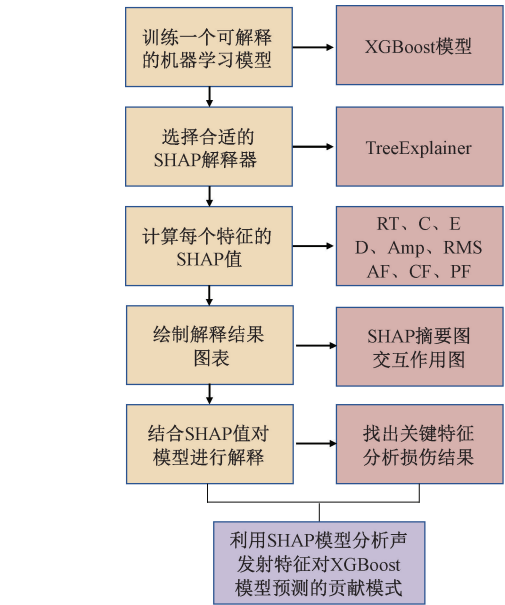


图 14 SHAP 模型的应用步骤

Fig. 14 Application steps of the SHAP model

型,使用 TreeExplainer;

第 3 步:计算每个特征的 SHAP 值。使用解释器对模型的输入特征进行解释,得到每个特征、每个特征对应的 SHAP 值。SHAP 值表示,该特征对该样本最终预测值的正向或负向贡献程度;

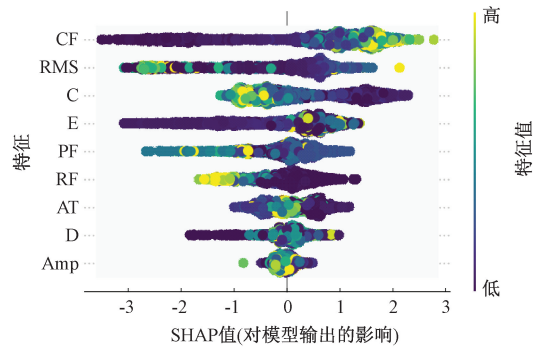
第 4 步:绘制解释结果图表。SHAP 提供多种可视化方式帮助理解模型行为,包括 SHAP 摘要图和 SHAP 交互作用图等。本文分析了 SHAP 摘要图,展示全体样本中各特征的平均重要性及其对预测结果的影响方向。交互作用图可以分析两个特征间的交互作用对模型预测的影响。

第 5 步:结合 SHAP 值对模型进行解释。通过分析 SHAP 值的大小和方向,可以分析哪些特征最关键,可以推断某个特征值的升高或降低是否推动预测结果上升或下降。

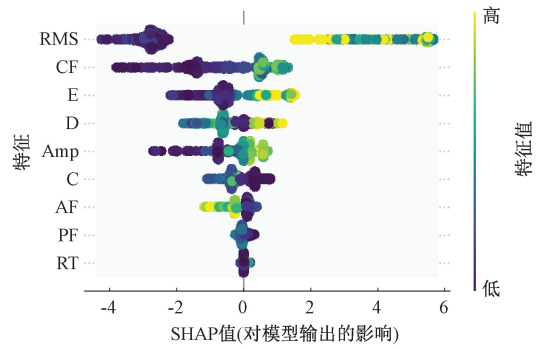
1) CFRP/steel 粘接接头的 SHAP 摘要图分析

图 15(a)~(d)分别描述了 L25D3、L50D3、L75D3 和 L100D3 的 SHAP 摘要图。图 15 中的 X 轴表示 SHAP 值,SHAP 值代表每个特征对模型输出的贡献。正值推动模型输出更接近某类结果,负值则推动输出远离该结果。Y 轴左轴代表的是声发射特征,按重要性从上到下进行排序。

从 4 个不同的搭接长度的 SHAP 摘要图来看,随着搭接长度的增加,声发射特征对模型预测的贡献模式发生了明显变化。具体表现为:短搭接长度(L25D3 和 L50D3)下,声发射信号的特征贡献较为分散,多个特征(如质心频率 CF、持续时间 D、RMS 值等)具有较大的 SHAP 值。随着搭接长度的增加(L75D3 和 L100D3),SHAP 值趋于集中,特别是 RMS 值和质心频率(CF)的贡

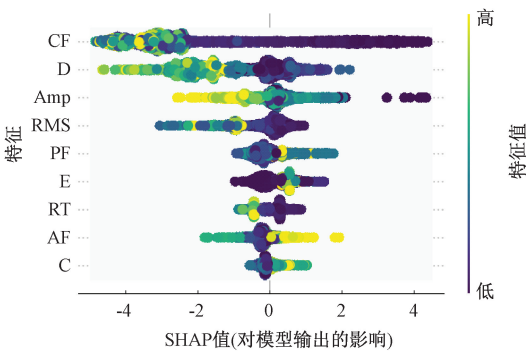


(c) L75D3 SHAP摘要图
(c) The SHAP summary plot of L75D3

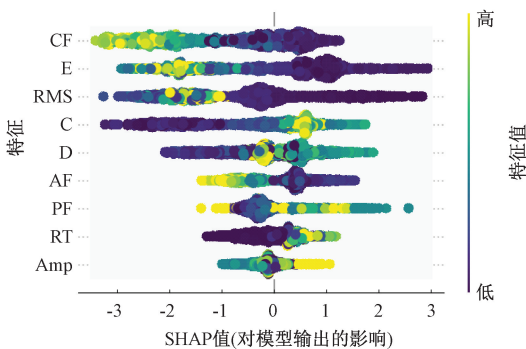


(d) L100D3 SHAP摘要图
(d) The SHAP summary plot of L100D3

图 15 CFRP/steel 粘接接头不同搭接长度的 SHAP 摘要图
Fig. 15 SHAP summary plot for CFRP/steel bonded joints with different overlap lengths



(a) L25D3 SHAP摘要图
(a) The SHAP summary plot of L25D3



(b) L50D3 SHAP摘要图
(b) The SHAP summary plot of L50D3

献显著上升。这表明较长搭接长度下的破坏行为更加稳定,损伤扩展过程中声发射特征的变化更具规律性。在 L25D3 和 L50D3 中,质心频率和 RMS 两个特征值对模型输出有较大影响,表明在短搭接长度下,破坏多为粘结失效和基体开裂,且损伤过程释放的高频信号可能更加剧烈。随着搭接长度从 L25D3 到 L50D3 的增加,RMS 值对模型的影响逐渐增大。这可能与较短搭接长度下的粘结界面产生微裂纹有关,RMS 值反映了微裂纹发展过程中声发射能量的累积效应。

在 L75D3 的模型中,RMS 依然是最重要的特征,表明在中等搭接长度下,能量释放较为集中,且与局部损伤扩展的关系密切。两者交互作用显著,表明在这一搭接长度下,接头的破坏模式可能较为复杂,包括内聚破坏和粘结破坏的共同作用。RMS 值在 L100D3 中对模型的影响显著增大,反映了较长搭接长度下损伤的能量累积过程。由于粘结界面更大,局部应力集中的影响减小,破坏模式更加趋于稳定。随着搭接长度增加,能量特征的贡献也变得更为重要,表明在 L100D3 中,破坏的能量释放过程更加缓慢而均匀,可能与界面层的逐渐分离或粘结失效有关。

通过分析不同搭接长度下声发射特征的贡献,可以推测出各搭接长度的破坏模式。短搭接长度(L25D3 和 L50D3)情况下应力集中效应更为显著,损伤模式由内聚破坏和基体开裂共同主导,声发射信号特征较为复杂且高频信号突出。长搭接长度(L75D3 和 L100D3)情况下声发射特征较为均衡,表现较为平稳的损伤扩展过程。RMS 与质心频率交互显著,损伤以粘结破坏和内聚破坏为主。

2) CFRP/steel 粘接接头 SHAP 特征交互作用分析

图 16 为 CFRP/steel 粘接接头的 SHAP 特征交互作用图。搭接长度的变化会直接影响 CFRP/steel 粘接接头的力学性能,包括破坏强度、损伤扩展路径以及声发射信号的特征。因此,图 16 中的声发射特征(如质心频率、持续时间、幅值、能量等)可以反映出不同搭接长度下的破坏行为差异。对于较短搭接长度,可能导致应力集中现象更为显著,从而更早地产生声发射信号。这些信号可能具有较高的质心频率和较短的持续时间,代表微裂纹的快速萌生和能量释放不均匀。而对于较长的搭接长度,则可能由于界面粘结面积增大,接头破坏延迟,声发射信号的幅值和持续时间变长,能量释放的过程更加缓慢而稳定。此时,较大的能量特征和较长的上升时间可能反映出大范围损伤的扩展,如粘结破坏和内聚破坏。

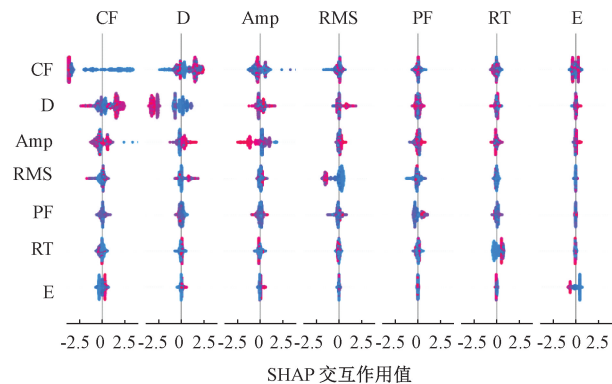


图 16 CFRP/steel 粘接接头 SHAP 特征交互作用

Fig. 16 SHAP interaction plot of CFRP/steel bonded joints

从图 16 中还可以看出,质心频率较高可能表现较小的局部裂纹萌生,在较长搭接长度下,质心频率较低则可能表现更大范围的粘结失效。因此,质心频率与持续时间、能量等特征的交互反映了搭接长度变化对损伤扩展的影响。当搭接长度较大时,接头破坏的能量释放过程更加平缓,这可能体现在较高的能量值

与幅值的显著交互上。而在较短的搭接长度下,能量释放可能较为剧烈且局部化,表现为较低的幅值与能

量交互。通过分析声发射特征在 SHAP 交互作用图中的贡献,还可以识别出哪些特征在不同搭接长度下对失效预测具有更大的影响。对于较大的持续时间和上升时间可能对应的是较长的搭接长度,此时接头在较大应力下的破坏模式更复杂,裂纹扩展时间更长。而较小的搭接长度可能导致裂纹集中在局部区域,产生较低频率且较剧烈的声发射信号,从而导致这些特征在模型预测中的贡献较大。

综上所述,对于短搭接长度,破坏模式可能以粘结破坏和基体开裂为主,导致早期损伤发生,声发射特征中可能表现为较高的质心频率和较大的幅值。此时 SHAP 交互作用图中的特征贡献可以用来识别该破坏模式。对于长搭接长度,接头破坏模式更接近于内聚破坏和粘结破坏。声发射信号的持续时间和能量值较大,质心频率较低,表明损伤过程较为缓慢且稳定。通过图中不同特征的交互作用,可以揭示长搭接长度对接头整体失效行为的影响。

4 结 论

本研究结合 AE 与 DIC 技术,对 25、50、75 和 100 mm 这 4 种不同搭接长度的 CFRP/steel 粘接接头在准静态拉伸下的损伤演化行为进行了系统研究,并构建了基于 XGBoost 的搭接长度识别模型和 SHAP 解释模型。主要结论为:

1) 力学实验结果表明,搭接长度对 CFRP/steel 粘接接头的力学性能有显著影响。随着搭接长度的增加,接头的极限载荷和最大失效位移也逐渐增大。实验结果表明,搭接长度为 100 mm 的接头表现出最佳的力学性能,最大拉伸载荷为 60.70 kN,大约是搭接长度为 75 mm 接头的 2 倍,说明较长的搭接长度能够更好地平衡应力分布和结构完整性。

2) AE 和 DIC 结果表明,接头的损伤过程大致可分为 3 个阶段。在初始拉伸阶段,幅值主要集中在 40~75 dB,此阶段产生的 AE 信号主要是由钢的变形和接头内部裂纹的增长产生;在稳定拉伸阶段,幅值主要集中在 50~80 dB,此阶段主要发生纤维断裂和基体开裂。在第 3 阶段,出现许多高幅值 AE 信号,此阶段主要发生内聚破坏和粘结破坏。短搭接长度接头以粘结破坏和基体开裂为主,长搭接长度接头以粘结破坏和内聚破坏为主。

3) 机器学习模型的识别结果表明,在决策树、随机森林、Adaboost 和 XGBoost 4 种模型中,XGBoost 模型是最佳的接头搭接长度识别模型,准确率达 94%。该模型以

AE 特征为输入,实现了不同搭接长度接头的精确预测,可以作为 SHAP 模型解释的桥梁。

4) SHAP 模型结果表明,质心频率、RMS 值和能量被识别为主要特征,并且随着搭接长度的增加,其在所有 AE 特征的贡献也逐渐增大,揭示了搭接长度对接头损伤行为的显著影响。此外,短搭接长度具有较高的质心频率和较短的持续时间,损伤以粘结破坏和基体开裂为主。长搭接长度具有较高的持续时间和较高的能量,损伤以粘结破坏和内聚破坏为主。

5) 未来研究将聚焦于提高 AE 技术的损伤识别精度及其工程适应性。此外,为了提升 CFRP/steel 粘接接头损伤的识别能力,可尝试多源信息融合、引入时频联合特征,并发展图神经网络(GNN)与多模态学习模型实现空间定位与损伤机制识别。同时,将面向桥梁结构和船体结构的服役健康监测,探索在腐蚀条件下工程中的应用部署与预警阈值设定策略。

参考文献

- [1] 刘远,彭炜亮,卢超,等. 航空复合材料板非接触空气耦合超声导波多损伤快速成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 103-115.
- LIU Y, PENG W L, LU C H, et al. Multi-damage rapid imaging method of non-contact air-coupled ultrasonic guided wave for aircraft composite plates[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 103-115.
- [2] YU Q Q, GU X L, ZHAO X L, et al. Characterization of model uncertainty of adhesively bonded CFRP-to-steel joints[J]. Composite Structures, 2019, 215: 150-165.
- [3] 王奕首,王明华,刘德博,等. 声发射在复合材料贮箱上的应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 1-17.
- WANG Y S H, WANG M H, LIU D B, et al. Research progress on the application of acoustic emission to composite tanks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 1-17.
- [4] 丁凯旋,陈冀景,皮一涵,等. 基于非接触光声成像的碳纤维增强复合材料冲击损伤检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 37-45.
- DING K X, CHEN J J, PI Y H, et al. Non-contact photoacoustic imaging-based detection of impact damage in carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 37-45.
- [5] PALIWAL I, RAMJI M. Failure behavior of single-lap CFRP hybrid joints fastened using micro-bolt[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153: 107599.
- [6] PALIWAL I, RAMJI M. A detailed study on the damage evolution and failure assessment of single-lap hybrid joints in CFRP laminates under tensile loading[J]. Composite Structures, 2022, 299: 116021.
- [7] CHEN S H ZH, FENG D C H, HAN W S H, et al. Development of data-driven prediction model for CFRP-steel bond strength by implementing ensemble learning algorithms[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124470.
- [8] WANG S B, STRATFORD T, LI Y, et al. Data-driven estimates of the strength and failure modes of CFRP-steel bonded joints by implementing the CTGAN method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 299: 109962.
- [9] 李晓虎,李晓章,李田. 粘结层厚度不均匀对 CFRP-钢界面粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 4024-4040.
- LI X H, LI X ZH, LI T. Influence of uneven thickness of bonding layer on the bonding performance of CFRP-steel interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 4024-4040.
- [10] 王海涛,卞致宁,熊浩,等. 粘结层和预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1718-1728.
- WANG H T, BIAN ZH N, XIONG H, et al. Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1718-1728.
- [11] 李游,李洪仪,马小琬,等. 高温对基于研发胶黏剂的 CFRP 板-钢板搭接界面力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6596-6609.
- LI Y, LI H Y, MA X W, et al. Effect of high temperature on mechanical properties of CFRP plate-steel plate lapping interface based on developed adhesive[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6596-6609.
- [12] 张玉彬,陈丽娜,刘鹏谦,等. CFRP-钢胶接结构内部损伤的增强型电磁感应热成像检测[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 5004-5015.

- ZHANG Y B, CHEN L N, LIU P Q, et al. Enhanced electromagnetic induction thermography detection of internal damage in CFRP/steel adhesively bonded structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 5004-5015.
- [13] WANG B, SUN Y F, LI Y ZH, et al. Debonding damage detection in cfrp plate-strengthened steel beam using electromechanical impedance technique [J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2296.
- [14] MALINOWSKI P, WANDOWSKI T, OSTACHOWICZ W. The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre-reinforced polymer[J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(4): 332-344.
- [15] WOJTCZAK E, RUCKA M. Damage imaging algorithm for non-destructive inspection of CFRP/steel adhesive joints based on ultrasonic guided wave propagation[J]. *Composite Structures*, 2022, 297: 115930.
- [16] OCHÓA P, VILLEGAS I F, GROVES R M, et al. Diagnostic of manufacturing defects in ultrasonically welded thermoplastic composite joints using ultrasonic guided waves[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102126.
- [17] OCHÓA P, VILLEGAS I F, GROVES R M, et al. Experimental assessment of the influence of welding process parameters on Lamb wave transmission across ultrasonically welded thermoplastic composite joints[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 99: 197-218.
- [18] SHERAFAT M H, GUITEL R, QUAEGEBEUR N, et al. Guided wave scattering behavior in composite bonded assemblies [J]. *Composite Structures*, 2016, 136: 696-705.
- [19] XIE J, WU CH W, GAO L M, et al. Detection of internal defects in CFRP strengthened steel structures using eddy current pulsed thermography[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282: 122642.
- [20] ZHANG Y B, XU CH H, LIU P Q, et al. One-dimensional deep convolutional autoencoder active infrared thermography: Enhanced visualization of internal defects in FRP composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 272: 111216.
- [21] ZHENG Y X, HU K J, ZHANG M, et al. Characterizing damage patterns and evolution in Multi-Hole GLARE laminates under tensile load via integrated AE and DIC techniques [J]. *Composite Structures*, 2024, 331: 117911.
- [22] ANDRAJU L B, RAJU G. Damage characterization of CFRP laminates using acoustic emission and digital image correlation: Clustering, damage identification and classification [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 277: 108993.
- [23] ASHRAF S, RUCKA M. Microcrack monitoring and fracture evolution of polyolefin and steel fibre concrete beams using integrated acoustic emission and digital image correlation techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 395: 132306.
- [24] ZHANG ZH, XU CH H, XIE J, et al. MFCC-LSTM framework for leak detection and leak size identification in gas-liquid two-phase flow pipelines based on acoustic emission[J]. *Measurement*, 2023, 219: 113238.
- [25] ZHANG ZH Y, XU CH H, XIE J, et al. Damage characterization of CFRP /steel double-lap bonded joints based on AE and DIC[J]. *Composite Structures*, 2024, 346: 118441.
- [26] 周灵杰, 余艳华, 何佳明, 等. 基于声发射和蝙蝠算法的三点弯曲作用下 CFRP 加固钢管的损伤性能[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(2): 975-990.
- ZHOU L J, SHE Y H, HE J M, et al. Research on damage performance of steel tube reinforced by CFRP under three-point bending loads based on acoustic emission and bat algorithm[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(2): 975-990.
- [27] DROUBI M G, FAISAL N H, ORR F, et al. Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 134: 28-37.
- [28] SHIRAIWA T, KAWATE M, BRIFFOD F, et al. Evaluation of hydrogen-induced cracking in high-strength steel welded joints by acoustic emission technique[J]. *Materials & Design*, 2020, 190: 108573.
- [29] XU W K, WU Q, ZHANG H Q, et al. Debonding monitoring of CFRP T-joint using optical acoustic

- emission sensor[J]. *Composite Structures*, 2021, 273: 114266.
- [30] ANAY R, MILLER D, TESSEMA A, et al. An experimental investigation concerning the effect of AFP defects on progressive damage in CFRP coupons[J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114725.
- [31] SAMBORSKI S, RZECZKOWSKI J, KORZEC-STRZAŁKA I. Experimental study of delamination process in elastically coupled laminates with the acoustic emission technique[J]. *Engineering Structures*, 2024, 300: 117196.
- [32] WEI Y, JIN X H, LUO Q T, et al. Adhesively bonded joints-a review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 276: 111225.
- [33] AHMED O, WANG X, TRAN M V, et al. Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 223: 109136.
- [34] TSOKANAS P, SANTANDREA F, MOMM G G, et al. Certification of adhesively bonded structures: Review and outlook [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2025: 104041.
- [35] LI W C, PALARDY G. Damage monitoring methods for fiber-reinforced polymer joints: A review[J]. *Composite Structures*, 2022, 299: 116043.
- [36] ZHANG H Y, ZHANG L, LIU ZH, et al. Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: A review[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113606.
- [37] SUN L G, LI CH, TIE Y, et al. Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 95: 102402.
- [38] LI J F, YAN Y, ZHANG T T, et al. Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 57: 95-104.
- [39] OZEL A, YAZICI B, AKPINAR S, et al. A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 62: 167-174.
- [40] RODRÍGUEZ R Q, DE PAIVA W P, SOLLERO P. Failure criteria for adhesively bonded joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, 37: 26-36.
- [41] HE J J, SHI Y J, XU L H, et al. Exploring the scale effect of urban thermal environment through XGBoost model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 114: 105763.
- [42] NIAZKAR M, MENAPACE A, DHAWAN P, et al. Applications of XGBoost in water resources engineering: A systematic literature review (Dec 2018-May 2023)[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 174: 105971.
- [43] ALSULAMY S. Predicting construction delay risks in Saudi Arabian projects: A comparative analysis of CatBoost, XGBoost, and LGBM [J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 268: 126268.
- [44] 王雨虹, 王志中. 基于 RFRFE 与 ISSA-XGBoost 的变压器故障辨识方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12): 142-150.
- WANG Y H, WANG ZH ZH. Transformer fault identification method based on RFRFE and ISSA-XGBoost[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(12): 142-150.
- [45] BAPTISTA M L, GOEBEL K, HENRIQUES E M P. Relation between prognostics predictor evaluation metrics and local interpretability SHAP values [J]. *Artificial Intelligence*, 2022, 306: 103667.
- [46] 肖寅东, 曾宇通, 刘科, 等. 基于 XGBoost 的模拟集成电路测试参数优化方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(4): 61-68.
- XIAO Y D, ZENG Y T, LIU K, et al. Test parameter optimization method for analog IC testing by XGBoost[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(4): 61-68.
- [47] BIAŁEK J, BUJALSKI W, WOJDAN K, et al. Dataset level explanation of heat demand forecasting ANN with SHAP[J]. *Energy*, 2022, 261: 125075.
- [48] 王元庆, 李佳玥, 刘备, 等. 基于 XGBoost-SHAP 方法的建设项目碳排放空间异质性分析[J]. *环境科学*,

2025, 46(7): 4090-4100.

WANG Y Q, LI J Y, LIU B, et al. Spatial heterogeneity of carbon emissions from construction projects based on XGBoost-SHAP[J]. Environment Science, 2025, 46(7): 4090-4100.

- [49] HAMILTON R I, PAPADOPOULOS P N. Using SHAP values and machine learning to understand trends in the transient stability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1384-1397.
- [50] SAEEDIFAR M, SALEH M N, DE FREITAS S T, et al. Damage characterization of adhesively-bonded Bi-material joints using acoustic emission[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107356.
- [51] ZHANG R, YAN X, GUO L. Deep learning-based classification of damage-induced acoustic emission signals in UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129285.
- [52] XU D, LIU P F, CHEN Z P. A deep learning method for damage prognostics of fiber-reinforced composite laminates using acoustic emission [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 259: 108139.

作者简介



张志远, 2018 年于西安航空学院获得学士学位, 2021 年于东北石油大学获得硕士学位, 现为中国石油大学(华东)博士研究生, 主要研究方向为声发射无损检测技术。

E-mail: zzy77721@163.com

Zhang Zhiyuan received his B. Sc. degree from Xi'an Aeronautical University in 2018, and his M. Sc. degree from Northeast Petroleum University in 2021. He is currently pursuing his Ph. D. degree at China University of Petroleum (East China). His main research interest is acoustic emission non-destructive testing technology.



徐长航(通信作者), 1998 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 2005 年于中国石油大学(华东)获得博士学位, 现为中国石油大学(华东)教授, 主要研究方向为无损检测与结构健康监测技术。

E-mail: chxu@upc.edu.cn

Xu Changhang (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees from China University of Petroleum (East China) in 1998 and 2005, respectively. He is currently a professor at China University of Petroleum (East China). His main research interests include acoustic emission non-destructive testing and structural health monitoring techniques.