

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.012

碳纤维增强复合材料加固柏木轴压裂纹演化规律的研究

谢玉强, 余艳华*, 黄俊杰, 李猛, 何佳明

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

摘要:为研究2层不同角度碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic, CFRP)加固柏木的受压裂纹演化规律,对分别粘贴2层30°、60°、90° CFRP的柏木进行单轴压缩试验,利用声发射(Acoustic Emission, AE)技术和数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术对试件的裂纹演化过程进行监测,最后结合数值模拟对试件的荷载位移曲线进行验证并提供加固木材的方法指导。结果表明,声发射信号可以反映试件裂纹的萌生规律及力学特性,CFRP包裹角度越大,试件裂纹扩展越平缓,延性越高,最大承载力越高;RA-AF分析法和DIC表面云图的结合可以反映试件裂纹类型、萌生的位置及扩展过程,试件的裂纹均以张拉型裂纹为主,且CFRP包裹角度越大,裂纹就越容易在端部产生;AE技术、RA-AF分析法、DIC技术和数值模拟的结合为进一步研究CFRP包裹角度与裂纹演化规律的影响关系提供参考。

关键词:柏木;CFRP;声发射;数字图像相关技术;数值模拟;裂纹

中图分类号:S781.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0102-15

Study on the Evolution Law of Axial Fracturing of Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic Reinforced Cypress

XIE Yuqiang, SHE Yanhua*, HUANG Junjie, LI Meng, HE Jiaming

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract:In order to study the evolution law of compressive cracks in two layers of CFRP reinforced cypress with different angles, uniaxial compression experiments were conducted on cypress wood with two layers of 30°, 60°, and 90° CFRP, respectively. Acoustic Emission (AE) technology and Digital Image Correlation (DIC) technology were used to monitor the crack evolution process of the specimens. Finally, numerical simulation was used to verify the load displacement curve of the specimens and provide guidance on strengthening the wood. The results showed that the acoustic emission signal can reflect the initiation law and mechanical characteristics of cracks in the specimen. The larger the CFRP wrapping angle, the smoother the crack propagation, the higher the ductility and the higher the maximum bearing capacity. The combination of RA-AF analysis method and DIC surface cloud map can reflect the type of crack, location of initiation, and propagation process of the specimen. The cracks in the specimen were mainly tensile type cracks, and the larger the CFRP wrapping angle, the easier it was for cracks to occur at the end. The combination of AE technology, RA-AF analysis method, DIC technology, and numerical simulation provides a reference for further studying the relationship between the wrapping angle of CFRP and the crack evolution law.

Keywords:Cypress; CFRP; acoustic emission; digital image correlation; numerical simulation; crack

0 引言

我国木结构建筑蕴盖了宫殿、桥梁和园林等

收稿日期:2023-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51408057);住房与城乡建设部科学技术项目(2021-K-0860);湖北省自然科学基金项目(2023AFB804)。

第一作者简介:谢玉强,硕士研究生。研究方向为结构健康安全监测。E-mail:xyq8u8@126.com

*通信作者:余艳华,博士,副教授。研究方向为结构健康安全监测。E-mail:syh916@126.com

引文格式:谢玉强,余艳华,黄俊杰,等。碳纤维增强复合材料加固柏木轴压裂纹演化规律的研究[J].2024,40(2):102-116.

XIE Y Q, SHE Y H, HUANG J J, et al. Study on the evolution law of axial fracturing of carbon fiber reinforced polymer/plastic reinforced cypress[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):102-116.

各大领域,即使其拥有高强重比和可再生等优异特性,但存在的易开裂、易老化等方面的缺陷,导致木结构建筑需要进行更好的加固和维修。纤维增强复合塑料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)材料因轻质高强、耐久性能好、抗疲劳性能好和可设计性强等优点近些年在木结构加固领域的应用越来越多。

国内外学者针对不同种类纤维布、不同加固方式及纤维布加固层数对加固试件的受力性能进行了研究,研究表明采用碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic, CFRP)加固构件且采用环向加固方式的效果优于其他纤维布^[1-4],加固2层CFRP时各类构件的承载力、极限位移和延性提升幅度最明显^[5-9],同时结合数值模拟对相应的试验结果进行验证^[10-11]。由于声发射(Acoustic Emission, AE)技术可以定位试件损伤部位、活性

和强度, Rescalvo 等^[12]利用声发射技术研究了影响木材和 CFRP 之间的黏结界面结合能力的因素, Ghiassi 等^[13]研究了声发射信号在 GFRP 和砖脱黏过程中界面断裂和损伤行为, 胡玲等^[14]比较了在不同粘贴层数下 BFRP(玄武岩纤维布)与木材之间的极限荷载和黏结应力的分布情况。通过对声发射基本参数的处理总结出的 RA-AF 分析法可以分析试件破坏过程中裂纹类型的演变, 目前已经成功用作于表征裂纹在混凝土中的扩展特征^[15-18], 近年来在木材领域也有研究^[19]。由于 AE 技术无法实现对裂纹扩展规律的预测, 而数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术可以通过对比变形前后的散斑位置得出试件表面测量区域的应变场和位移场填补这一缺陷, 目前广泛用于木材^[20-21]、岩石^[22]和煤岩^[23]等领域, 巩翠芝等^[24]将环境扫描电子显微镜下的力学试验与数字散斑相关分析相结合, 通过显微观察区域的位移场和应变场, 可以定量分析木材的损伤断裂行为, 揭示木材的细、微观力学损伤机制。李猛等^[25]通过 AE 和 DIC 研究了不同含水率杉木轴压时裂纹萌生规律。

前人研究表明利用 AE 技术、RA-AF 分析法、DIC 技术或数值模拟可以很好地反映试件裂纹萌生、裂纹类型及裂纹扩展过程。但以上学者研究试

件损伤过程的方法都比较单一, 不能全面反映试件裂纹演化的过程, 且通过 RA、AF 值分析裂纹类型的方法在木材领域中运用很少。所以综合 AE 技术、RA-AF 分析法、DIC 技术和数值模拟在各研究领域的优势, 对 2 层不同角度 CFRP 包裹柏木的裂纹演化规律进行更全面更深入的研究。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用的木构件为川中丘陵区人工林的圆柱体柏木, 木构件气干含水率为 8%, 密度为 0.365 g/cm^3 , 树龄为 15 a, 材料参数见表 1; 根据 GB/T 3354—2014^[26]测定的 CFRP 的力学性能见表 2; 粘贴胶水为广东恒大新材料公司的卡夫特双组份环氧树脂类胶水, 根据 GB/T 6329—1996^[27]和 GB/T 6328—2021^[28]测定其力学性能见表 3。

表 1 柏木的材料参数

Tab. 1 Material parameters of cypress

密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ Density	顺纹抗压强度/MPa Longitudinal compressive strength	纵向弹性模量/MPa Longitudinal modulus of elasticity
0.45	53	8 000

表 2 CFRP 的材料参数

Tab. 2 Material parameters of CFRP

密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ Density	厚度/mm Thickness	极限抗拉强度/MPa Ultimate tensile strength	极限拉伸应变(%) Ultimate tensile strain	纵向弹性模量/MPa Longitudinal modulus of elasticity	横向弹性模量/MPa Transverse modulus of elasticity	环向断裂应变(%) Hoop fibre rupture strain
1.53	0.167	2 142	1.01	211 495	7 930	0.71

表 3 胶水的材料参数

Tab. 3 Material parameters of the glue

抗剪强度/MPa Shear strength	抗拉强度/MPa Tensile strength	弹性模量/GPa Elastic modulus	极限伸长率(%) Ultimate elongation
14.2	52.8	2.9	2.8

1.2 试件的制备和加载

制备了 2 层 CFRP 包裹角度(θ)分别为 30° 、 60° 、 90° 的圆柱体柏木构件各 3 个, 共 9 个。试件的尺寸均为 $60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}(d \times h)$, 试件加固示意图如图 1 所示。

CFRP 通过 4 个步骤黏附在木材上。首先, 使用塑料胶带将木材侧面的黏合区域和上下面的非黏合区分开, 防止环氧树脂类胶水流入未黏合的区域影响试验。其次, 擦拭黏合区域的表面, 然后用蘸

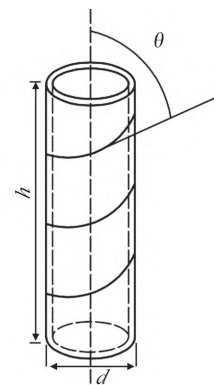


图 1 试件加固示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen reinforcement

有清洁剂的抹布擦拭, 以防止气泡在环氧树脂类胶水层中形成, 这将导致 CFRP 和木材表面之间的黏结不足。然后, 将双组份环氧树脂类胶水按 m_1 (环

氧树脂胶) : m_2 (环氧固化剂) = 2 : 1 配合使用先后施加到木材的黏合区域,并且在黏合剂完全凝固之前,将填充有环氧树脂类胶水的 CFRP 布按不同角度缠绕到木材侧面的黏合区域,然后用刷子沿 CFRP 包裹方向多次滚刷,充分排除 CFRP 和木材接触面上的孔隙及气泡,保证 CFRP 及试件紧密贴合,然后重复试验将第二层 CFRP 粘贴到第一层 CFRP 上,最后将包裹好的试件在室温下静置 2 周,保证黏合层完全硬化。需要注意的是,由于木材表面孔隙度和 CFRP 材料差异的原因,木材和 CFRP 之间胶水的使用量略多于 CFRP 之间胶水的使用量,但差异很小,试验操作中保证胶水可以铺满各个表面且无气泡,使两者紧紧粘贴在一起即可。

柏木构件的轴压荷载试验在 WAW-300 B 微机电液伺服压力试验机进行,试验过程采用位移加载方式进行,加载速率保持在 0.2 mm/s。声发射检测系统为 DS5 动静态声发射一体机(北京软岛时代科技),木构件的表面粘贴 6 个声发射传感器,通道门限值为 20 mV,传感器频率范围为 30 ~ 500 kHz,前置放大器增益为 40 dB,声发射传感器位置如图 2 所示。数字采集系统为 XTDIC 三维全场应变测量系统(新拓三维技术有限公司),由 CCD 相机和记录分析仪组成,CCD 相机放置在试件正前方 250 mm 处,用于采集木构件破坏时的完整图像。试验过程中,试验机、声发射系统和数字图像系统三者同步采集数据。加载装置如图 3 所示。

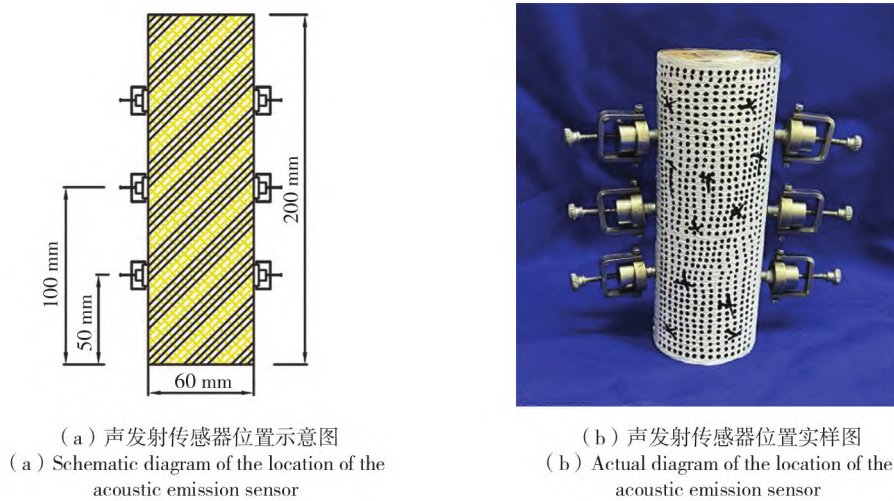


图 2 声发射传感器位置图

Fig. 2 Acoustic emission sensor location map

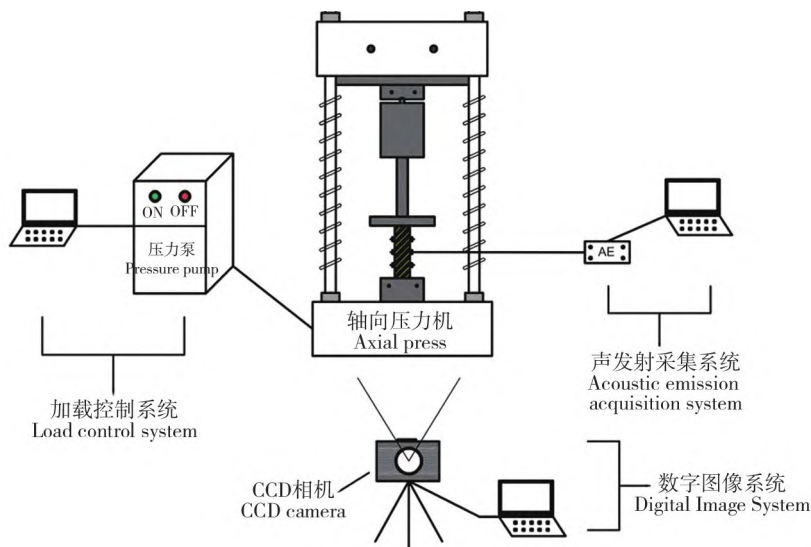


图 3 加载装置图

Fig. 3 Diagram of the loading device

1.3 RA-AF 关联分析法

在声发射参数中,RA(上升时间与幅度的比值)和AF(振铃计数与持续时间的比值)是一组表征试件断裂机制的重要参数。JCMS-IIIB5706 提出将 RA 和 AF 进行关联分析可以有效区分混凝土材料张拉型裂纹和剪切型裂纹,其判定方法如图 4 所示^[29],以斜率为 k 的直线作为分界线,其左上部的低 RA 和高 AF 的信号对应张拉型裂纹,右下部的低 RA 和高 AF 的信号对应张拉型裂纹,在本研究中此处的 k 取 $50^{[18]}$ 。

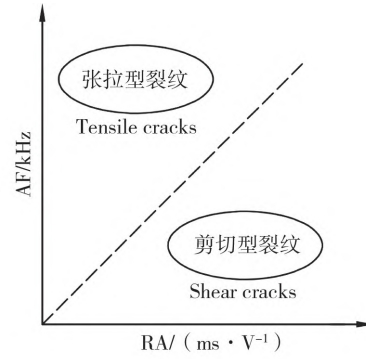


图 4 基于 JCMS-IIIB5706 的裂纹分类
Fig. 4 Crack classification in JCMS-IIIB5706

2 基于声发射参数的裂缝扩展特征分析及结果

2.1 基本参数分析

图 5 为 2 层 30° CFRP 包裹柏木的 0~60 s 时间

段的相应声发射分析参量图,第 1 阶段为起始压实阶段(0~8.5 s),随着构件自带微裂缝的压实和封闭,会产生少量的振铃计数及能量,且累积振铃计数、累积能量和荷载位移曲线斜率基本为 0,幅值主

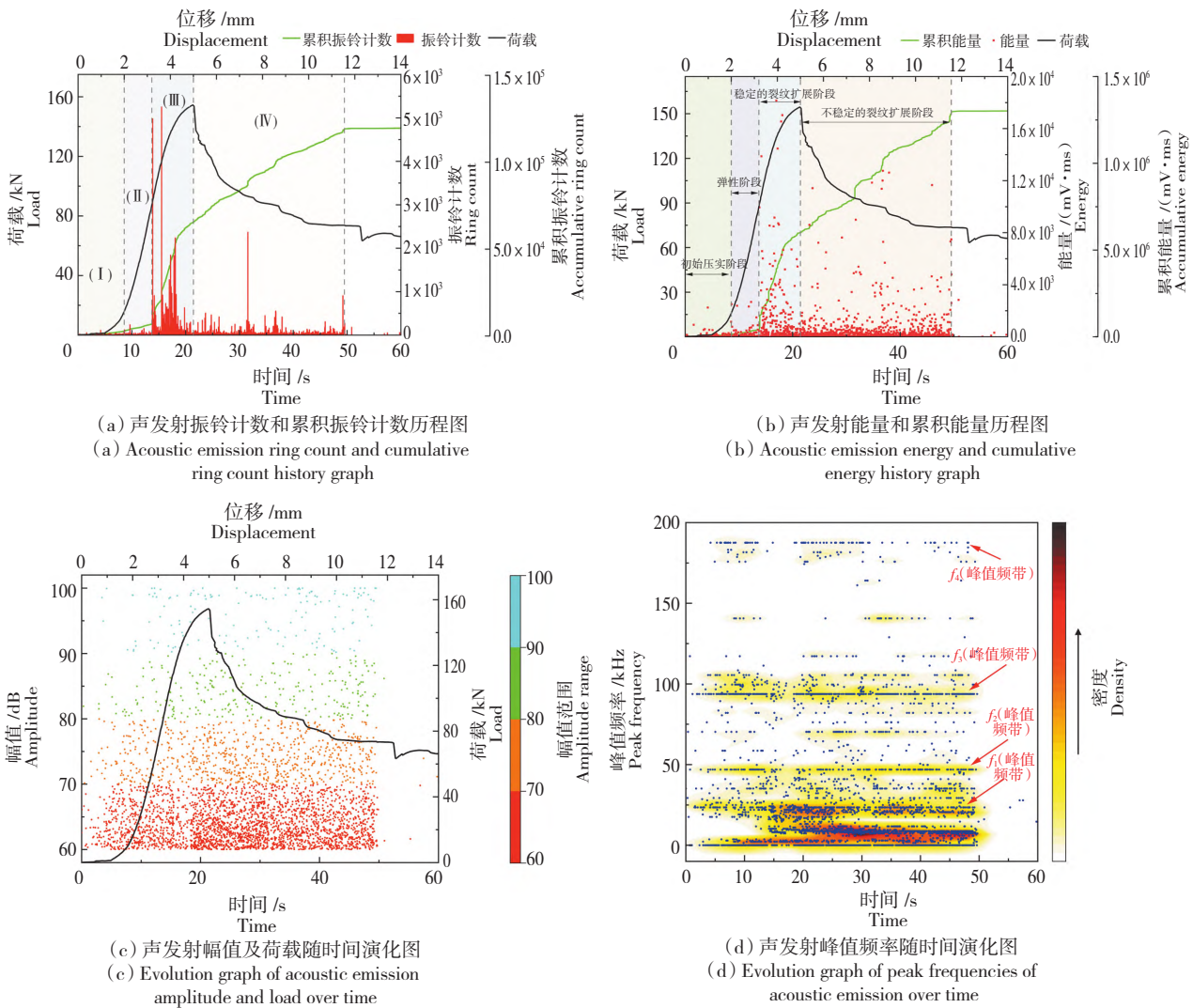


图 5 2 层 30° CFRP 包裹柏木的声发射参数图

Fig. 5 2-layer 30° CFRP-wrapped cypress acoustic emission parameter diagram

要分布在 60~85 dB 范围内;随着荷载的施加,试件进入第 2 阶段弹性变形阶段(8.5~13.5 s),由于 CFRP 的加固一定程度限制了木材内部裂纹的产生,导致出现振铃计数幅值抖动但大小仍然偏小,累积能量曲线的增长仍然不是很明显,但高能量点增多大小在 3 000 以下,相应累积曲线斜率开始变大,高幅值数量变多。第 3 阶段为稳定的裂纹扩展阶段(13.5~21.5 s),声发射信号的明显增长起始点可以看作是弹性区和微裂纹的边界,该阶段加载至最大荷载的 57%、加载点竖向位移为 3.2 mm,振铃计数出现第一个幅值和反复增加降低的现象,范围在 0~5 500,高能量事件发生也最频繁,相应累积曲线斜率也相应增大,幅值范围分布在 60~100 dB,可以看出 70~90 dB 的幅值分布更为集中,期间可以听到轻微的开裂声音,可以认为 $t=13.5$ s 时对应的竖向位移为 3.2 mm 是裂纹产生的时间点。第 4 阶段为不稳定的裂纹扩展阶段,当小裂纹合并贯穿形成大裂纹时就会出现声发射信号指数增长,说明裂纹出现了不稳定扩展现象,此阶段伴随着持续的加载开裂声音,但声音很小,振铃计数在 32 s 左右出现了峰值,大小在 2 500 左右,此后也出现了小幅度抖动,此后时间的高幅值分布较上一阶段也更密集,说明在这个时间处 CFRP 出现断裂现象,之前产生众多裂纹高能量事件较为分散,累积振铃计数和累积能量曲线斜率变得较上一阶段平缓,在 60 s 左右,中下部大部分 CFRP 已经被拉坏,可以看出木材的中上部产生多条明显的竖向裂纹,从而使其承载力急剧下降直至试件完全破坏。

从图 5(d) 的峰值频率分布密度颜色可以看出,木材峰值频率随到达时间呈带状分布,该带状峰值频率称为峰值频带。基于峰值频率的范围,将 CFRP 包裹木材的峰值频率分为 4 个峰值频段,低频段(0~50 kHz)、中低频段(50~100 kHz)、中高频段(100~150 kHz)和高频段(150~200 kHz)。2 层 30° CFRP 包裹木材主要形成 4 条峰值频带, f_1 (23.437 kHz)、 f_2 (46.875 kHz)、 f_3 (93.75 kHz)和 f_4 (187.5 kHz),其中峰值频率点在低频段占比更高,主要范围为 0~25 kHz。

同理分析 2 层 60° 和 90° 声发射参数变化规律(图 6 和图 7),将 $t=12$ s 对应的加载点竖向位移为 2.9 mm、 $t=3$ s 对应的加载点竖向位移为 2.7 mm 分别作为 CFRP 包裹角度为 60° 和 90° 试件裂纹产生

的时间点。对比图 5—图 7,发现试件的承载力与累积振铃计数呈负相关,90° CFRP 包裹的柏木为承载力最大的试件,在裂纹发展前期(I—III 阶段)累积振铃计数为 6.8×10^3 次,而 60° CFRP 包裹的试件为 1.6×10^4 次、30° CFRP 包裹的试件为 6.5×10^4 次,这是因为承载力越小的试件更容易引起微裂纹的产生和扩展,从而导致声发射信号更加活跃,累积振铃计数就越大,说明 CFRP 的加固能够抑制裂纹的萌生和扩展,并随着加固角度增大,抑制效果更明显;其次随着 CFRP 包裹角度的增加,加载前期高能量点在减少,高能量事件出现的时间在滞后,结合荷载位移曲线可以得出,CFRP 加固角度越大,试件的延性就越高,变形能力就越差。不同的是,90° CFRP 包裹的 3 个试件中其中一个试件在进入弹性变形阶段时就产生第 1 个声发射振铃计数峰值,说明此时内部产生第 1 个较大的裂纹,这可能是由于材料自身特性差异造成的,其他 2 个试件未表现出相似特征,但其声发射信号在前 3 个阶段都呈现较稳定的趋势。综上所述,CFRP 加固角度越大,声发射信号值就越低,越不容易发生陡增现象,说明裂纹发展得越平缓,从图 6(d) 和图 7(d) 的峰值频率分布密度颜色可以看出,60° CFRP 包裹木材主要形成 4 条峰值频带, f_1 (46.875 kHz)、 f_2 (93.75 kHz)、 f_3 (105.468 kHz)和 f_4 (117.187 kHz),其中峰值频率点在中高频段占比更高,主要范围为 100~125 kHz;90° CFRP 包裹木材主要形成 4 条峰值频带, f_1 (78.125 kHz)、 f_2 (97.656 kHz)、 f_3 (107.421 kHz)和 f_4 (117.187 kHz),其中峰值频率点在中高频段占比更高,主要范围为 100~125 kHz。对比三者峰值频率分布图可以得出,CFRP 包裹角度越大,声发射峰值频率参数点在中高频段(100~150 kHz)的占比也越大。

2.2 RA-AF 关联分析法分析破坏类型

图 8 为不同角度 CFRP 包裹柏木的实际损伤图和声发射损伤定位图,声发射损伤点越多说明在此区域损伤越严重。为保证数据分析的可靠性,图 9 绘出不同角度 CFRP 包裹下加载至轴向位移 10 mm 时各试件破坏过程的 RA-AF 分布图,可以看出 RA 值分布范围大多集中在 0~3 ms/V,AF 值主要分布范围为 0~300 kHz,且裂纹发展类型均以张拉型裂纹为主。

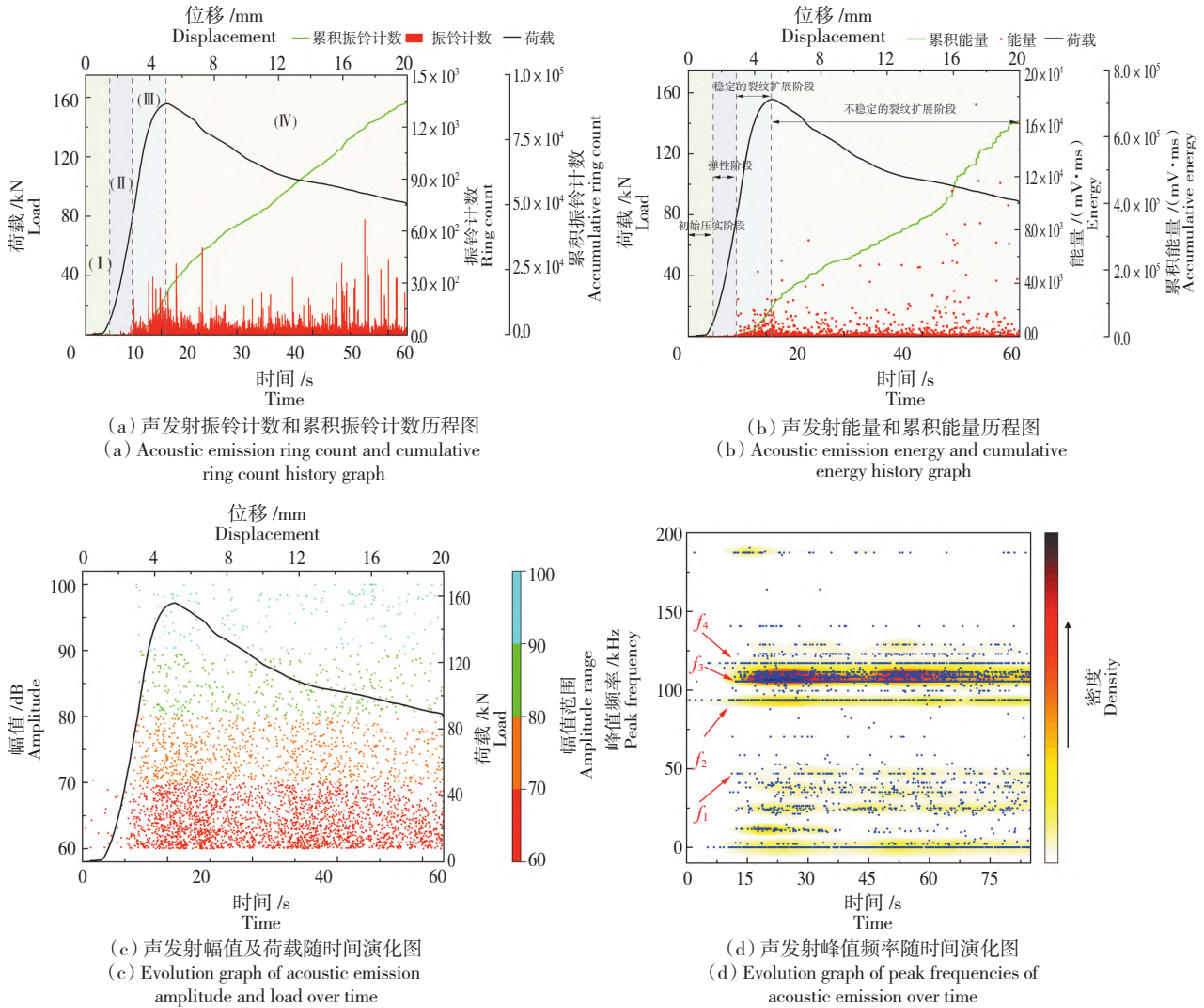


图 6 2 层 60° CFRP 包裹柏木的声发射参数图

Fig. 6 2-layer 60° CFRP-wrapped cypress acoustic emission parameter diagram

从图 8(a) 可以观察到 30° CFRP 包裹的试件是沿着顺纹方向从上到下被拉开破坏的,类似于劈裂破坏,产生的主要裂纹为张拉裂纹,声发射三维损伤定位图的损伤点的均匀分布情况也说明了这一点,当主要裂纹形成后若继续加载,试件就会失稳,竖向裂纹就会往侧面发展然后折断,产生少量以高 RA 值低 AF 值为特征的剪切裂纹,且图 9(a) 剪切裂纹的比例最高,故可以说明 30° CFRP 包裹破坏形式为全截面的拉剪混合破坏。从观察图 8(b) 60° CFRP 包裹的试件的破坏形式,其上部几乎没有观察到裂纹且声发射三维损伤定位图上部也无损伤点,结合图 9(b) 反映出来的低剪切裂纹的比例,可以判断其裂纹是从中部以下某个位置开始萌生的,且产生的主要竖向裂纹在后期加载过程中向侧面发展的情况轻于 30° CFRP 包裹的试件,最终破

坏形式为底部的局部压溃破坏。图 8(c) 为 90° CFRP 包裹试件的破坏形式,其上部只观察少量裂纹,下部有明显的压溃现象,裂纹较多,声发射三维损伤定位图上部有少量损伤点,损伤点更多集中在下部,结合图 9(c) 和图 9(a) 的剪切裂纹占例,可以综合推断出裂纹也有向侧面发展的情况,最终破坏形式为端部的局部压溃破坏。

3 基于数字图像系统的应变场分析

以上分析表明通过 AE 技术和 RA-AF 分析法可以分析裂纹萌生扩展的过程,包括裂纹向侧面发展的情况,但在研究裂纹萌生位置及扩展方向的能力上有缺陷。文献[30]在利用 DIC 研究 BFRP 与混凝土梁的界面脱黏行为中,发现在 BFRP 表面应变较大的区域,BFRP 会优先发生脱黏,同时混凝土

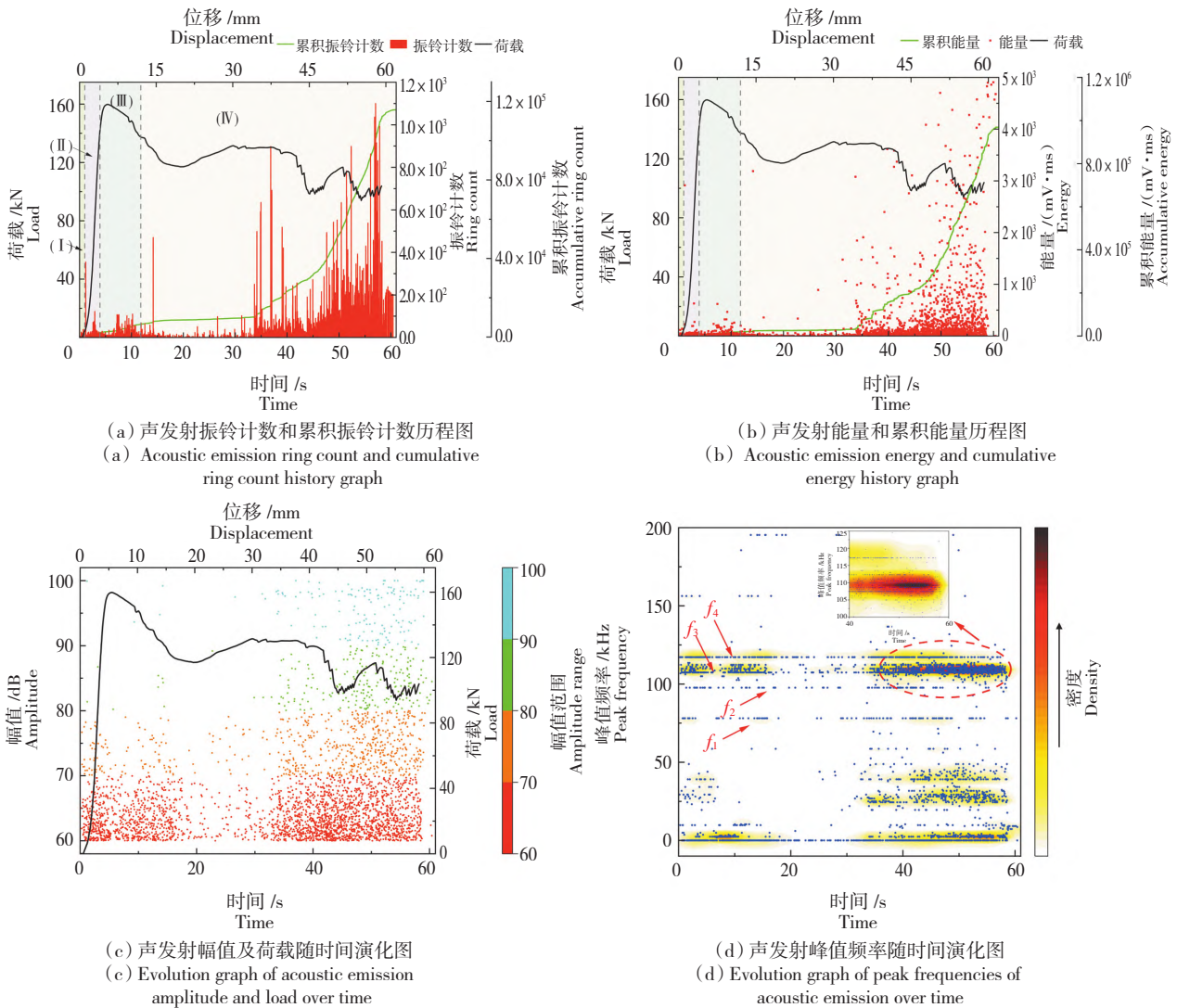


图7 2层90°CFRP包裹柏木的声发射参数图

Fig. 7 2-layer 90° CFRP-wrapped cypress acoustic emission parameter diagram

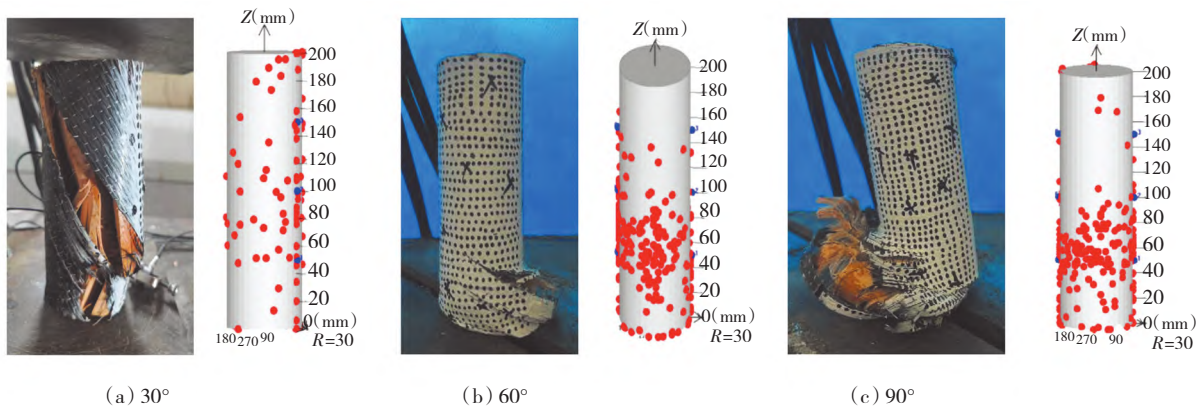


图8 不同角度CFRP包裹柏木的实际损伤与声发射损伤定位图

Fig. 8 Localization map of actual damage and acoustic emission damage of CFRP-wrapped cypress at different angles

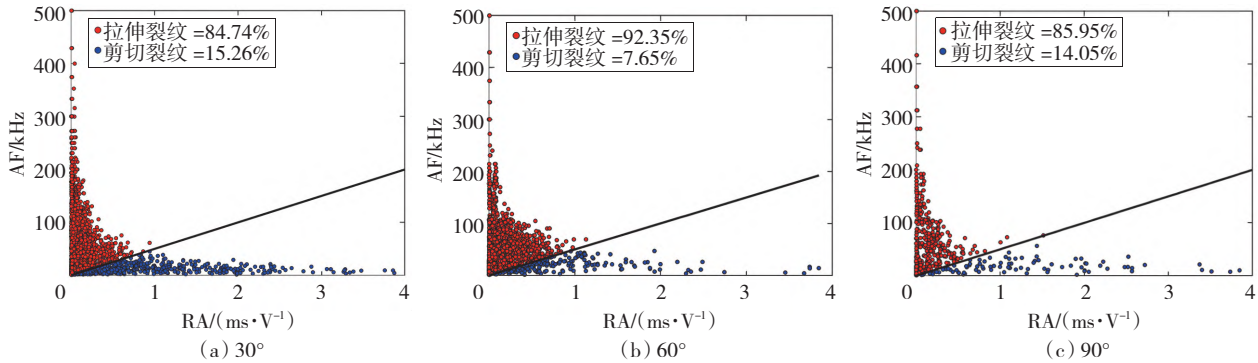


图 9 不同角度 CFRP 包裹柏木的 RA-AF 分布图

Fig. 9 RA-AF distribution of CFRP-wrapped cypress at different angles

发生内聚破坏产生裂纹,而且在这些脱黏区域的剪应力会较大,说明黏贴剂可以很有效地将界面应力传递给包裹的纤维和混凝土基体;文献[31]在研究 CFRP 加固木柱的试验中,发现 CFRP 的拉压应力与木柱该区域发生的拉压变形具有一致性,当木柱被压缩膨胀时,木柱的某处会产生裂纹和错位,由于两者之间具有的良好黏结性能,导致此处的 CFRP 条带应变也会相应变大。因此,借助 DIC 技术监测的 CFRP 表面应变的变化来间接研究内部木材裂纹的萌生区域及扩展的方向。将 A、B、C 和 D 4 点分别作为弹性变形阶段的开始、稳定的裂纹扩展阶段的开始、不稳定的裂纹扩展阶段的初期和不稳定的裂纹扩展阶段的末期。

图 10 为 2 层 30° CFRP 包裹柏木的各点表面应变云图。可见进入弹性变形阶段时,应变云图首次在中下部出现明显应力集中区域,此处应变达到 0.011 76,由图 10 可以看出,在试件中部偏左的位置也有应变扩大趋势;当试件加载刚进入到稳定的裂纹扩展阶段时,应变云图中侧位置云图逐渐发展已经形成了一个应变集中区域,中下部应力集中区域向侧面延伸,此时应力集中区域的最大应变突然增加到 0.034 47,说明此时已经有肉眼观察不到的微裂纹开始产生;在不稳定的裂纹扩展阶段初期,位移云图紫色区域继续向下延伸,应变云图的 2 个应力集中点开始向中侧部汇合,主要应变范围为 0.021 54~0.063 51,其他范围应变变化不大,说明

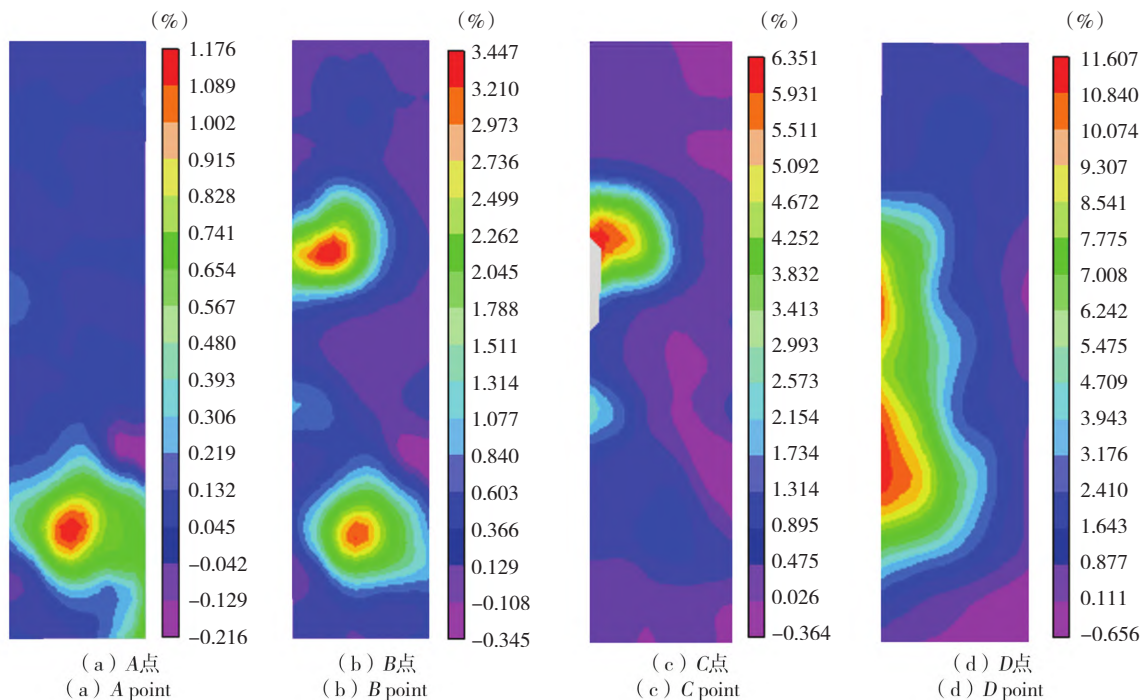


图 10 2 层 30° CFRP 包裹柏木的各点表面应变云图

Fig. 10 2-layers 30° CFRP-wrapped cypress each point surface strain cloud map

试件的裂纹在向侧面扩展;当裂纹逐渐发展持续到不稳定的裂纹扩展阶段的末期时,应变云图的 2 个应力集中区域已经完全汇合,最大应变值增加到 0.116 07,随着应变的增大,试件开始失稳,纵向裂纹向两侧发展扩大,产生了明显的竖向裂纹,中下

部裂纹处的 CFRP 和木材开始脱离。

同理分析包裹角度为 60°和 90°试件的各点表面应变云图规律(图 11 和图 12),60° CFRP 包裹的试件的受力薄弱处在中右侧,B 点应变的陡增说明裂纹在此处开始萌生,但产生微裂纹的区域不大,

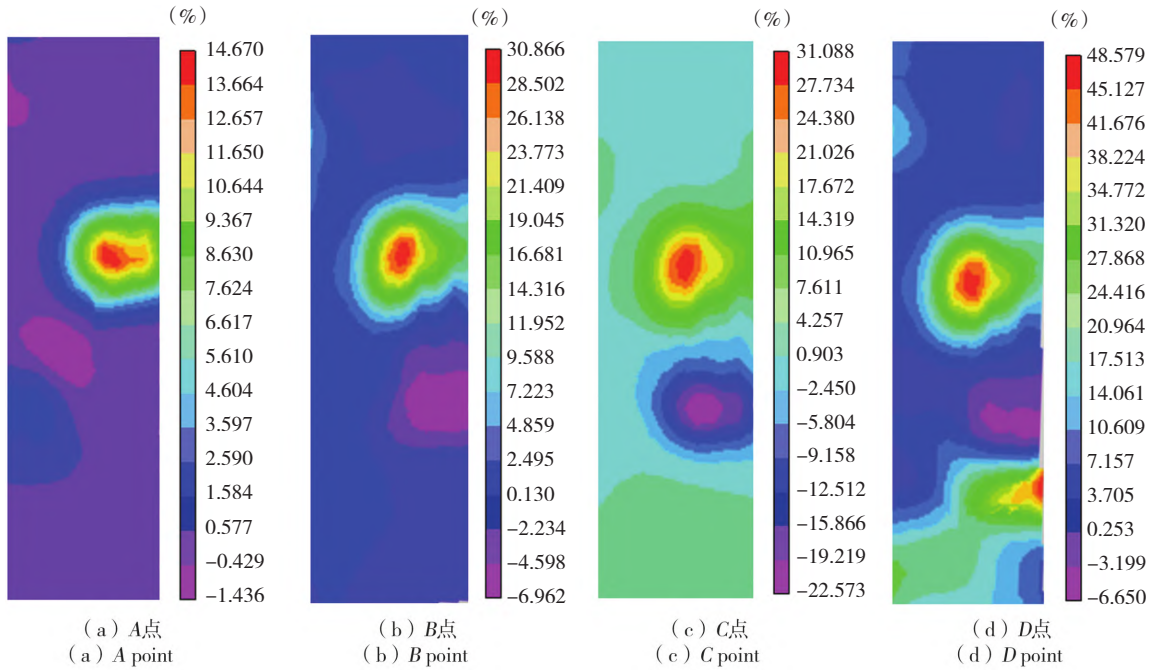


图 11 2 层 60° CFRP 包裹柏木的各点表面应变云图

Fig. 11 2-layers 60° CFRP-wrapped cypress each point surface strain cloud map

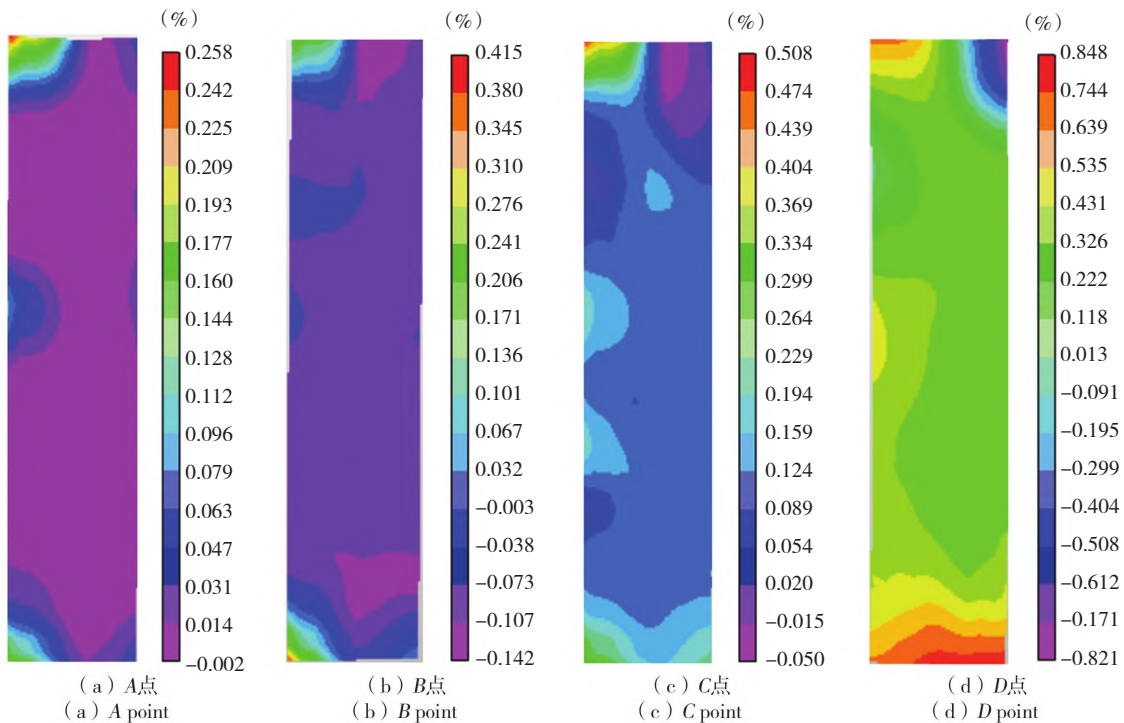


图 12 2 层 90° CFRP 包裹柏木的各点表面应变云图

Fig. 12 2-layers 90° CFRP-wrapped cypress each point surface strain cloud map

尚未成核形成宏观裂纹,在 C 点 2 处应变集中区域继续扩大,同时下侧绿色区域的应变少量增加,说明裂纹在往下侧发展,此时 CFRP 开始断裂,在 D 点,试件的右下侧出现斜向大范围应变区域,结合图 8(b)可以观察到,在此处的 CFRP 已经完全断裂,内部木材被往外压溃破坏;90° CFRP 包裹的试件的受力薄弱处在上部和下部,裂纹从试件的上下位置开始萌生,C 点处的试件左侧出现了 2 处青色区域,D 点处的试件下部出现的大应变红色区域大于试件上部,2 处应变大小陡增,试件左侧应变大于右侧部分,可以说明裂纹向左侧发展,且下部裂纹比上部裂纹更多,结合图 8(c)可以观察到,试件下侧偏左的 CFRP 完全断裂,木材向外被挤压破坏。综上所述,30° CFRP 包裹的试件裂纹以往侧面扩展为主,60° CFRP 包裹的试件裂纹以往中下部扩展为主,90° CFRP 包裹的试件裂纹以往上部和下部扩展为主,这说明 CFRP 包裹角度越大,裂纹就越容易在端部产生。

值得注意的是 30° CFRP 包裹的柏木应变云图,在初期产生的 2 个应变集中区域在后期有明显汇合现象,这就可以说明此试件初期在不同位置产生的裂纹在后期汇合了,而微裂纹的聚集与贯通产

生的能量是最高的,这与声发射能量历程图中高能点的数量反映出来的结果一致,同时结合 RA-AF 分析及试件实际破坏图,说明裂纹类型以张拉型裂纹为主,破坏形式为拉剪混合破坏。

综上所述,DIC 技术监测 CFRP 表面应变的变化能反映木材裂纹的萌生区域及扩展的基本方向,同时结合 AE 技术和 RA-AF 分析法可以更全面地研究受约束木材裂纹的演化过程。

4 数值模拟

4.1 材料本构

1) 由于木材各向异性的力学特性,本构关系参考文献[32],在 ABAQUS 中,采用工程常数来定义木材弹性阶段,采用 hill 屈服准则来定义木材不同屈服面的塑性阶段属性,所需力学参数见表 4^[33]。

2) CFRP 受拉时表现出脆性,一拉就断,在达到抗拉强度时为理想弹性材料,故本构关系参考文献[34],所需力学参数见表 5^[35]。

(3) CFRP 和木材之间的法线方向接触采用“硬”接触,切向方向接触采用内聚力模型模拟层间胶体失效情况,基于牵引-分离准则的双线性本构,如图 13 所示^[33],所需参数见表 6。

表 4 柏木在 ABAQUS 中的参数
Tab. 4 Cypress parameters in ABAQUS

弹性模量/MPa Elastic modulus			剪切模量/MPa Shear modulus			泊松比 Poisson's ratio		
E_L	E_R	E_T	G_{LT}	G_{LR}	G_{TR}	ν_{LT}	ν_{LR}	ν_{TR}
8000	500	500	650	650	60	0.35	0.05	0.4

注:L为木材纵向;R为木材径向;T为木材切向。

Note: L means wood longitudinal; R means wood radial; T means wood tangential direction.

表 5 CFRP 在 ABAQUS 中的参数
Tab. 5 CFRP parameters in ABAQUS

弹性模量/MPa Elastic modulus		剪切模量/GPa Shear modulus			泊松比 Poisson's ratio	纵向拉伸 强度/MPa Longitudinal tensile strength	纵向压缩 强度/MPa Longitudinal compressive strength	横向拉伸 强度/MPa Transverse tensile strength	横向压缩 强度/MPa Transverse compressive Strength	纵向剪切 强度/MPa Longitudinal shear strength	横向剪切 强度/MPa Transverse shear strength
E_1	E_2	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	X_1	X_2	Y_1	Y_2	S_{12}	S_{13}
211.49	7.93	5.3	5.3	4	0.35	2 142.08	1 414	37	169	134	120

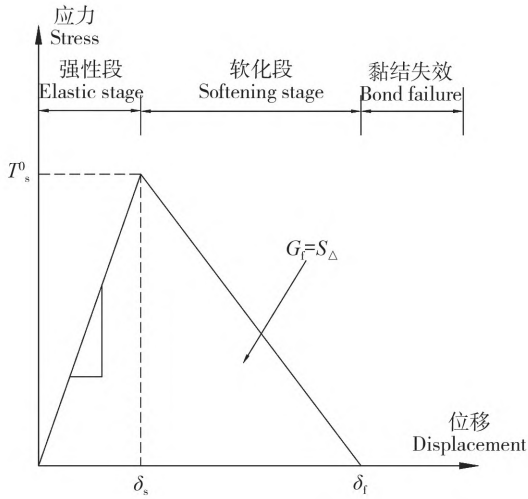
注:1为沿纤维方向;2为垂直于纤维方向;3为厚度方向。

Note: 1 means along the fiber direction; 2 means perpendicular to the fiber direction; 3 means thickness direction.

表 6 CFRP 和木材之间内聚力模型在 ABAQUS 中所需参数

Tab. 6 Parameters required for the cohesion model between CFRP and wood in ABAQUS

L 方向的刚度 L direction stiffness	R 方向 刚度 R direction stiffness	T 方向的刚度 T direction stiffness	法向应力 Normal stress	1 方向剪切应力 1 Directional shear stress	2 方向剪切应力 2 Directional shear stress	法向断裂能 Normal fracture energy	第 1 剪切 断裂能 First shear fracture energy	第 2 剪切 断裂能 Second shear fracture energy
1 830	1 830	1 830	11	11	11	3.3	3.3	3.3



T_s^0 为 S 方向上的最大主应力; δ_s 为最大主应力对应的位移; δ_f 为黏结失效位移; G_f 为断裂能; S_Δ 为三角形面积。

T_s^0 is the maximum principal stress in the S direction; δ_s is the displacement corresponding to the maximum principal stress; δ_f is the failure of the bond displacement; G_f is fracture energy; S_Δ is the area of a triangle.

图 13 内聚力单元牵引-分离关系

Fig. 13 Cohesive unit traction-separation relationship

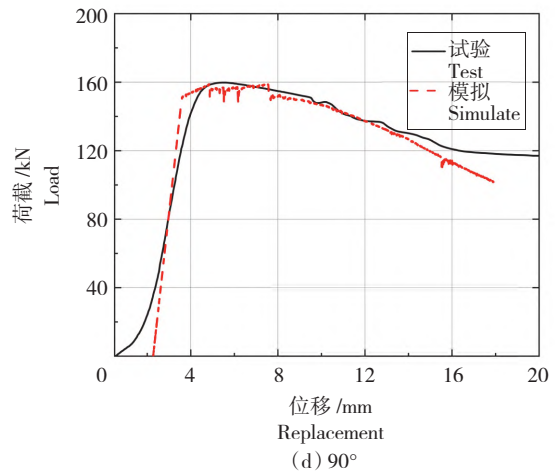
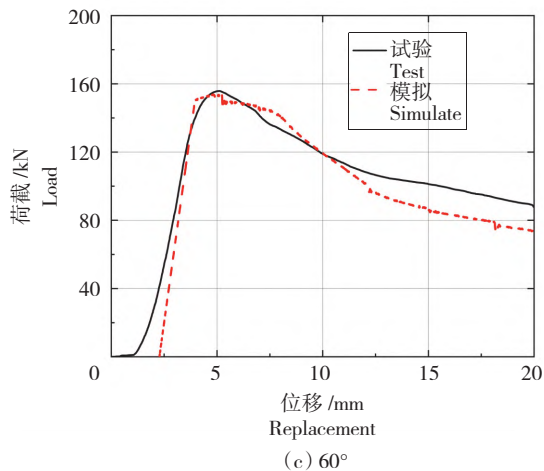
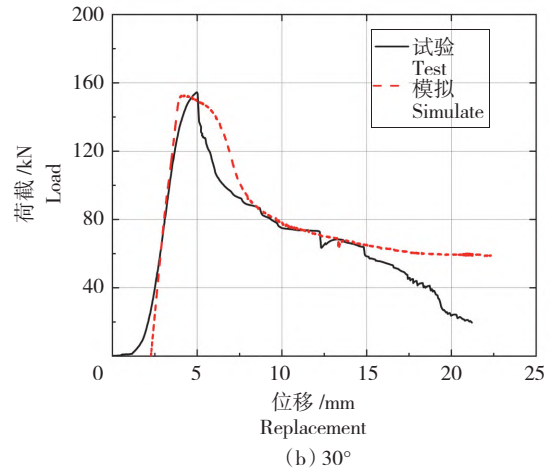
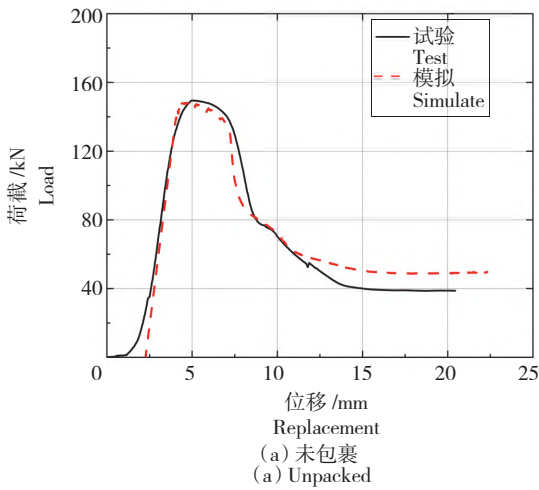


图 14 不同 CFRP 包裹角度柏木的荷载-位移曲线验证

Fig. 14 Verification of load-displacement curves of cypress at different CFRP-wrapped angles

4.2 单元类型及边界条件

Abaqus 分析步采用显示动力学模块,木材采用八节点线性实体单元 C3D8R,CFRP 采用三维四节点四边形壳单元 S4R。上下端板采用四节点三维双线性刚性四边形单元 R3D4。端板与木材的法向接触选择硬接触,切向选择库伦摩擦,系数为 0.3。短板上下分别设置参考点,参考点均与端面耦合,上部端板只允许发生轴向位移,其他方向的位移和转角全部限制住,下部端板采用固定约束,采用上端参考点轴向位移加载方式施加力。

4.3 结果分析

图 14(a)为未用 CFRP 包裹的柏木荷载-位移试验值和模拟值结果对比,图 14(b)、图 14(c)和图 14(d)为 CFRP 包裹角度分别为 30°、60°、90°下柏木荷载-位移曲线的试验和模拟结果对比,可以看出两者结果基本吻合,说明文中所建立的有限元模型及选取的材料本构关系是有效的。图 14 表明随着 CFRP 包裹角度的增加,试件荷载-位移曲线下降

幅度逐渐变得平缓,即延性变高,这是由于 CFRP 对木材的加固效果随着包裹角度逐渐增强,使得在竖向加载过程中两者可以更好地协同受压,延缓试件出现破坏导致承载力下降的时间;表 7 为不同 CFRP 包裹角度下试件的最大承载力试验值和模拟值对比,可见试件的最大承载力随着 CFRP 包裹角度的增加而提高,其中 CFRP 包裹角度为 30°和 60°时,最大承载力提高幅度仅为 3.3%和 4.2%,但当 CFRP 包裹角度为 90°时,最大承载力提高幅度较明显,为 6.9%。

通过 AE 技术、RA-AF 分析法可以分析裂纹萌生的时间点和裂纹往侧面发展形成剪切裂纹的可能性,虽然 CFRP 环向的包裹与木材可以协同受力,通过 DIC 技术可以观察到裂纹扩展的过程,但无法清晰定量地全面反映试件的损伤情况,故借助数值模拟更清楚更全面地呈现内部木材各个位置的应力情况和 CFRP 破坏情况从而对加固及修复木材提供方法指导。

图 15—图 17 给出轴向位移为 10 mm 时,各组试件的应力及纤维拉伸损伤初始标准 (HSNFTCRT) 分布情况。可以看出,CFRP 包裹角度越大,木材的米塞斯应力的红色区域就越大,其破坏特征就越接

近类似钢筋混凝土适筋梁受压时的破坏特征,当木材应变集中区域附近的 CFRP 破坏后木材受压破坏,两者更好地协同受力使木材充分发挥受压特性,所以对木材加固的效果也就越好,相应试件的延性也就越好,图 17(c)和图 17(d)说明了这一点,90° CFRP 破坏情况是最严重的。HSNFTCRT 值越趋向于 1 说明 CFRP 受拉破坏越严重,可以看出 30° CFRP 包裹柏木的 CFRP 在中下部损坏最严重,中部和上端也有相应的损坏;60° CFRP 包裹柏木的 CFRP 在各位置的损坏程度相当,在试件鼓曲附近的受拉损伤点较多;90° CFRP 包裹柏木的第 1 层 CFRP 在中间部位有不同程度的受拉损伤,在两端 1/4 处的损伤最严重,第 2 层 CFRP 的损伤点最多,范围最大。

综合数值模拟的云图和试件实际破坏情况,提出以下经济且高效的加固木材方式。针对 30° CFRP 包裹的柏木,以加固中部及以下区域为主;针对 60° CFRP 包裹的柏木,以加固中下侧区域为主;针对 90° CFRP 包裹的柏木,可以采用间隔包裹的方式,加固位置分别以上部、中部和下部部分区域为主。

表 7 不同 CFRP 包裹角度下试件的最大承载力试验值和模拟值对比

Tab. 7 Comparison of maximum bearing capacity test values and simulated values of specimens under different CFRP-wrapped angles

CFRP 包裹的柏木 CFRP-wrapped cypress	最大承载力试验值/kN Maximum bearing capacity test value	最大承载力模拟值/kN Maximum load capacity simulation value	相对误差 (%) Relative error	增幅 (%) Increase
未包裹 Unwrapped	149.5	148.1	0.94	0.0
包裹角度为 30° The wrapped angle is 30°	154.4	152.6	1.17	3.3
包裹角度为 60° The wrapped angle is 60°	155.8	153.2	1.67	4.2
包裹角度为 90° The wrapped angle is 90°	159.8	158.8	0.60	6.9

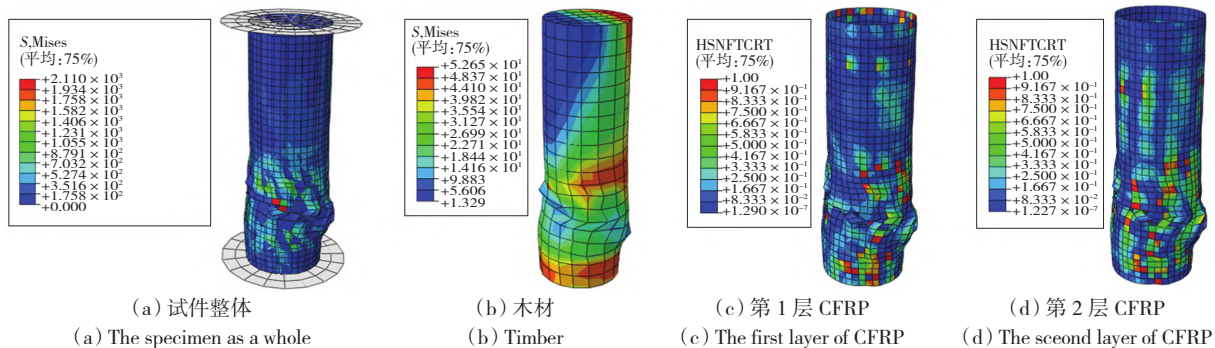


图 15 2 层 30° CFRP 包裹柏木的模拟云图

Fig. 15 2-layer 30° CFRP-wrapped cypress simulation cloud map

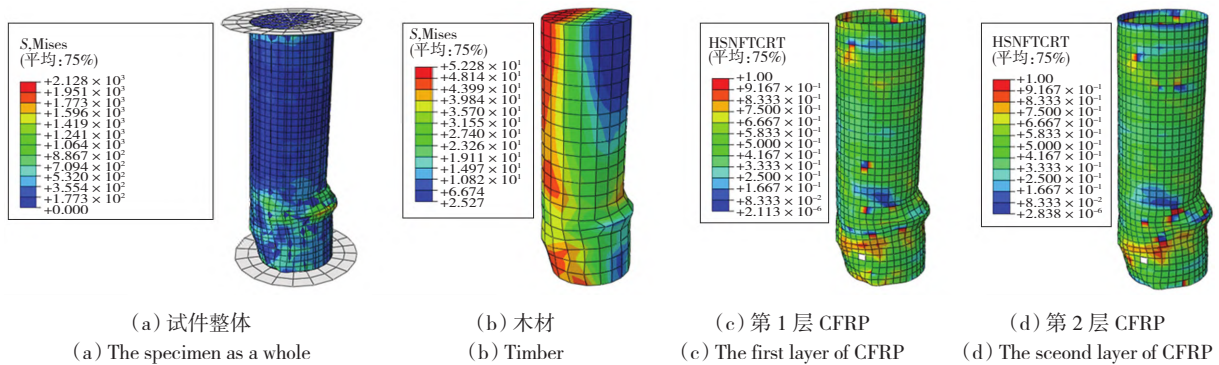


图 16 2层 60° CFRP 包裹柏木的模拟云图

Fig. 16 2-layer 60° CFRP-wrapped cypress simulation cloud map

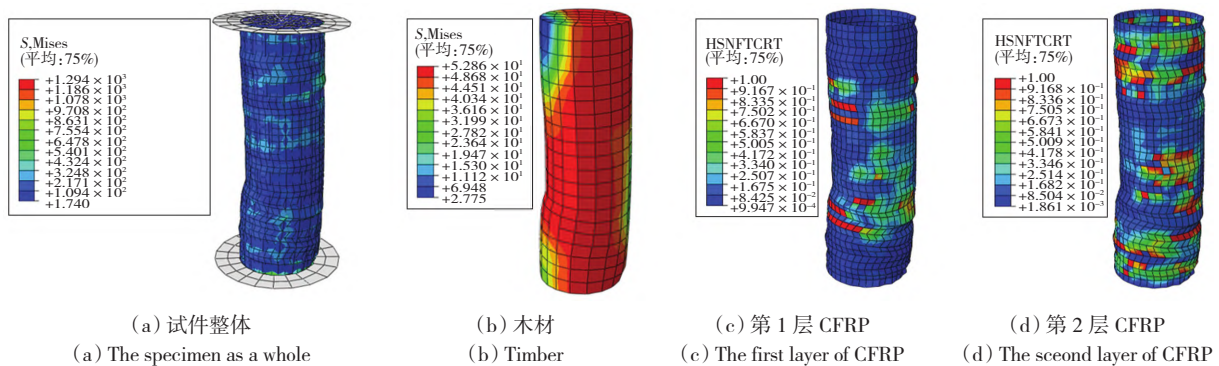


图 17 2层 90° CFRP 包裹柏木的模拟云图

Fig. 17 2-layer 90° CFRP-wrapped cypress simulation cloud map

5 结论

1) 声发射信号可以反映试件裂纹的萌生规律及力学特性。随着 CFRP 包裹角度的增加,加载前期高能点在减少,高能事件出现的时间在滞后,累积振铃计数在减少,峰值频率点在中高频段的占比在升高。说明 CFRP 包裹角度越大,声发射信号越稳定,裂纹发展得越平缓,延性越高,最大承载力越高,变形能力越差。

2) 实际损伤图、声发射损伤定位图和 RA-AF 分析法的结合可以尝试分析试件的破坏形式和裂纹的类型。30°、60°、90° CFRP 包裹的试件破坏形式分别为全截面的拉剪混合破坏、底部的局部压溃破坏和端部的局部压溃破坏;试件的裂纹类型均以张拉型裂纹为主。

3) DIC 技术可以通过呈现的各阶段应变云图来反映试件内部裂纹萌生的位置和扩展的方向。裂纹的萌生都是从试件不同位置的受力薄弱处开始产生的,30°、60°、90° CFRP 包裹柏木裂纹扩展方向分别以向侧面、中下部和两端为主,这说明 CFRP 包

裹角度越大,裂纹就越容易在端部产生。

4) 模拟的荷载位移曲线与试验结果吻合良好,并为更经济更高效加固木材提供方法指导。30° CFRP 包裹的柏木,以加固中部及以下区域为主;60° CFRP 包裹的柏木,以加固中下侧区域为主;90° CFRP 包裹的柏木,可以采用间隔包裹的方式,加固位置分别以上部、中部和下部部分区域为主。

5) 结合 AE 技术、RA-AF 分析法、DIC 技术和数值模拟的各个优势可以对 CFRP 加固柏木轴压裂纹的演化规律及损伤情况进行更全面更深入的研究。

【参 考 文 献】

- [1] 徐杰,姜绍飞. 纤维布加固墩接木柱轴压试验[J/OL]. 哈尔滨工业大学学报,2023,1-10.
XU J, JIANG S F. Experimental study on axial compression characteristics of spliced wood columns strengthened with FRP sheet[J/OL]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023;1-10.
- [2] 朱毅. 纤维布加固巴掌榫接木柱轴心受压试验研究

- [D]. 扬州:扬州大学,2016.
- ZHU Y. Experimental study of wooden posts strengthening with slap tenon joint by FRP [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [3] 杨思远,郭春泉,张芳. 梯级 CFRP 筋多塑性铰混凝土桥墩抗震性能研究[J]. 公路工程,2023,48(5):1-5,28.
- YANG S Y, GUO C Q, ZHANG F. Seismic vulnerability analysis of multi-plastic-hinge concrete bridge piers based on graded CFRP bars [J]. Highway Engineering, 2023, 48(5): 1-5, 28.
- [4] 秦怡源,刘献礼,岳彩旭,等. ET-GD 与 K 近邻相结合的刀具磨损监测方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2023,28(1):1-10.
- QIN Y Y, LIU X L, YUE C X, et al. Research on tool wear monitoring based on ET-GD and K-nearest neighbor algorithm[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(1): 1-10.
- [5] 朱艳梅,王清远,董江峰,等. FRP 加固圆木柱轴压性能的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(S2):52-56.
- ZHU Y M, WANG Q Y, DONG J F, et al. Experimental study on axial compression performance of FRP reinforcement round poles[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 52-56.
- [6] 马建勋,胡平,蒋湘闽,等. 碳纤维布加固木柱轴心抗压性能试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(8):40-44,55.
- MA J X, HU P, JIANG X M, et al. Experimental research on axial compressive behaviors for timber column strengthened with CFRP [J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 40-44, 55.
- [7] 许清风,朱雷,贡春成. CFRP 加固短木柱的试验研究[J]. 施工技术,2007,36(5):13-15,31.
- XU Q F, ZHU L, GONG C C. Experimental research on short timber columns strengthened with CFRP [J]. Construction Technology, 2007, 36(5): 13-15, 31.
- [8] 张阳,秦筵越,刘颖峰,等. 预应力钢丝绳-UHPC 复合加固损伤 RC 梁抗弯性能试验研究[J]. 公路工程,2023,48(2):1-6,80.
- ZHANG Y, QIN Y Y, LIU Y F, et al. Experimental study on the flexural performance of damaged RC beam strengthened by prestressed steel wire rope-ultra high performance concrete [J]. Highway Engineering, 2023, 48(2): 1-6, 80.
- [9] 许清风,朱雷. FRP 加固木结构的研究进展[J]. 工业建筑,2007,37(9):104-108.
- XU Q F, ZHU L. State-of-the-art of wood structure strengthened with frp [J]. Industrial Construction, 2007, 37(9): 104-108. 9
- [10] 顾辉祥,白羽,许进飞. 玄武岩纤维布加固木柱轴压性能试验研究与有限元分析[J]. 新型建筑材料,2023,50(5):42-47.
- GU H X, BAI Y, XU J F. Experimental study and finite element analysis on the axial compression performance of wooden columns strengthened with BFRP [J]. New Building Materials, 2023, 50(5): 42-47.
- [11] LOKUGE W, OTOOM O, BORZOU R, et al. Experimental and numerical analysis on the effectiveness of GFRP wrapping system on timber pile rehabilitation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00552.
- [12] RESCALVO F J, AGUILAR-AGUILERA A, SUAREZ E, et al. Acoustic emission during wood-CFRP adhesion tests [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 87: 79-90.
- [13] GHIASSI B, VERSTRYNGE E, LOURENCO P B, et al. Characterization of debonding in FRP-strengthened masonry using the acoustic emission technique [J]. Engineering Structures, 2014, 66: 24-34.
- [14] 胡玲,杨勇新,汪健根,等. 层数对玄武岩纤维布与木材有效粘结长度影响的试验研究[J]. 建筑结构,2010,40(2):67-69.
- HU L, YANG Y X, WANG J G, et al. Experimental study on the effective bond length between BFRP sheets and wood under different BFRP bond layers [J]. Building Structure, 2010, 40(2): 67-69.
- [15] HANIF M U, SEO S Y, VAN TRAN H, et al. Monitoring and characterizing the debonding in CFRP retrofitted RC beams using acoustic emission technology [J]. Developments in the Built Environment, 2023, 14: 100141.
- [16] BANJARA N K, SASMAL S, SRINIVAS V. Investigations on acoustic emission parameters during damage progression in shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete components [J]. Measurement, 2019, 137: 501-514.
- [17] DEV A, CHELLAPANDIAN M, PRAKASH S S, et al. Failure-mode analysis of macro-synthetic and hybrid fibre-reinforced concrete beams with GFRP bars using acoustic emission technique [J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118737.
- [18] GONG N N, HU S W, CHEN X D, et al. Fracture behavior and acoustic emission characteristics of reinforced concrete under mixed mode I-II load conditions [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 109: 102770.
- [19] 王婷. 平面内外加载下木质材料滚动剪切声发射特性研究 [D]. 南京:南京林业大学,2022.
- WANG T. Acoustic emission characteristics of rolling shear failure of wood materials under In-plane and out-plane shear loads [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.

- sity, 2022.
- [20] ZINK A G, DAVIDSON R W, HANNA R. Strain measurement in wood using a digital image correlation technique [J]. *Wood and Fiber Science*, 1995, 27: 346–359.
- [21] LIU W, YU Y, ZHANG Z X, et al. Impact resistance of CFRP-reinforced wood beams under axial force using a digital image correlation method [J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113276.
- [22] 杜凯, 邓建华, 王化俗, 等. 基于 3D-DIC 技术的约束岩石裂缝扩展研究 [J]. *力学季刊*, 2021, 42(4): 743–751.
DU K, DENG J H, WANG H S, et al. Research on constrained rock crack propagation based on 3D-DIC technology [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2021, 42(4): 743–751.
- [23] 彭阳, 高永涛, 王文林, 等. 单侧限压缩煤岩组合体的破裂机制研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(S1): 387–398.
PENG Y, GAO Y T, WANG W L, et al. Research on fracture mechanism of coal rock mass under the condition of one side restriction loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(S1): 387–398.
- [24] 巩翠芝, 刘一星, 王强, 等. 鱼鳞云杉 TR 型裂纹的演化与破坏模式 [J]. *林业科学*, 2011, 47(5): 101–105.
GONG C Z, LIU Y X, WANG Q, et al. The TR crack propagation system of *Picea jezoensis* var. *microserma* analyzed and damage mode monitored [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 101–105.
- [25] 李猛, 陈迪, 田康, 等. 不同含水率下木构件起裂荷载试验研究 [J]. *森林工程*, 2022, 38(4): 69–81.
LI M, CHEN D, TIAN K, et al. Experimental study on cracking load of wood members under different moisture content [J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(4): 69–81.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法; GB/T 3354—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials; GB/T 3354—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [27] 中国石油和化学工业协会. 胶粘剂对接接头拉伸强度的测定; GB/T 6329—1996 [S]. 上海: 全国胶粘剂标准化技术委员会, 1996.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Adhesives—determination of tensile strength of butt joints; GB/T 6329—1996 [S]. Shanghai: National Adhesive Standardization Technical Committee, 1996.
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 胶粘剂剪切冲击强度试验方法; GB/T 6328—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for shear impact strength of adhesive bonds; GB/T 6328—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [29] JCMS-III B5706. Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission [C]. Federation of Construction Materials Industries. Japan, 2003.
- [30] MENSAH C, BONSU A O, WANG Z Q. Interfacial behavior of externally bonded BFRP-to-concrete joints using different epoxy adhesives [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, 119: 103277.
- [31] SIHA A, ZHOU C D. Experimental study on hysteretic behavior of circular timber columns strengthened with wrapped CFRP strips and near surface mounted steel bars [J]. *Engineering Structures*, 2022, 263: 114416.
- [32] 岳祥虎. 钢管-木-混凝土轴压短柱力学性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
YUE X H. Study on behaviour of steel tube-wood-concrete short columns under axial compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [33] 王明谦, 宋晓滨, 顾祥林. 基于三维弹塑性损伤模型的木材非线性分析 [J]. *土木工程学报*, 2018, 51(7): 22–28, 49.
WANG M Q, SONG X B, GU X L. Nonlinear analysis of wood based on three-dimensional combined elastic-plastic and damage model [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(7): 22–28, 49.
- [34] 刘卓群. 新型 CFRP-圆钢管组合构件轴心荷载作用下力学性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
LIU Z Q. Research of mechanical properties under axial load of the novel improved CFRP-steel tube composite member [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [35] FANG C, ALI M, SHEIKH A. Experimental and numerical investigations on concrete filled carbon FRP tube (CFRP-CFFT) columns manufactured with ultra-high-performance fibre reinforced concrete [J]. *Composite Structures*, 2020, 239: 111982.
- [36] 齐威. ABAQUS 6.14 超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
QI W. ABAQUS 6.14 super learning manual [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.