

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209121

含缺陷纤维复合材料热老化后变形与 损伤破坏声发射行为*

郭雪吟^{1,2,3} 周伟^{1,2,3} 马连华^{1,2,3} 刘佳^{1,2,3} 姬晓龙^{1,2,3}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;

3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室 保定 071002)

摘要: 不同时间影响下玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的热老化效应亟待研究。本文采用声发射(AE)与数字图像相关技术(DIC)相结合的互补无损检测技术,分别对热老化0、4、8、16 d后三点弯曲试样的损伤过程进行实时监测,并进一步分析预制缺陷对热老化后复合材料的纤维与基体界面性能的影响。对AE信号进行K-means聚类分析同时通过DIC进行全局应变场测量,表征了预制缺陷和热老化时间对GFRP力学行为和变形损伤机理的影响。结果表明:声发射信号可以对各类损伤进行分类,通过分析脱粘信号发现,在层合板内部交联时,脱粘信号减少且分布在失效载荷后;随着热老化进展至水分挥发阶段,脱粘信号增多并均匀分布在断裂前期与后期。对于预制纤维断裂的层合板,交联现象会使层合板加载过程中纤维断裂信号数量减少且幅度降低,最大应变值减小,有效地提升了层合板承载能力。声发射聚类分析和数字图像相关技术结合可以较好地描述不同热老化条件下GFRP的损伤演化过程,有助于进一步揭示缺陷和热老化时间对GFRP内部损伤机理的影响规律。

关键词: 预制缺陷;声发射;热老化时间;K均值聚类;损伤机理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.5530

Acoustic emission behavior of deformation and damage of composite materials with defective fibers after thermal aging

Guo Xueyin^{1,2,3} Zhou Wei^{1,2,3} Ma Lianhua^{1,2,3} Liu Jia^{1,2,3} Ji Xiaolong^{1,2,3}

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding 071002, China;

3. Hebei Key Laboratory of Energy Metering and Safety Testing Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: The thermal aging effect of glass fiber reinforced composites (GFRP) under the influence of different time needs to be studied urgently. In this paper, the complementary nondestructive testing technology which combines acoustic emission(AE) and digital image correlation(DIC) technologies was used to monitor the damage process of three-point bending specimens after thermal aging at 0, 4, 8 and 16 days respectively. Finally, the effect of prefabrication defects on the fiber-matrix interface properties of composites after thermal aging was analyzed. K-means cluster analysis was performed on the AE signals and global strain field measurements were performed by DIC to characterize the effects of prefabrication defects and thermal aging time on the mechanical behavior and deformation damage process of GFRP. Acoustic emission signals can classify various types of damage, and through the analysis of debonding signals, it was found that when crosslinking inside the laminate, the debonding signal was reduced and distributed after the failure load; as the thermal aging progresses to the stage of moisture volatilization, the debonding signal increased and was evenly distributed in the pre-fracture and post-fracture stages. For prefabricated fiber fractured laminates, the crosslinking phenomenon will reduce the number and amplitude of fiber fracture signals during laminate loading, and the maximum strain value will be reduced, which will effectively improve the carrying capacity of the laminate. The combination of acoustic emission clustering analysis and digital image correlation technology can better describe the damage evolution of fiber-reinforced composites under different thermal aging conditions, which is helpful to further reveal the influence of defects and thermal aging time on internal damage mechanism.

Keywords: thermal ageing; acoustic emission; thermal aging time; K-means clustering; damage mechanism

0 引言

与金属材料相比,纤维增强复合材料具有高比强度、轻

质量、耐腐蚀的优点,因此经常代替其在恶劣环境下服役,在石油/海洋管道、风力发电和工厂领域得到广泛应用^[1-3]。

受高温等恶劣环境条件的影响,纤维增强复合材料内部

收稿日期:2022-03-01

* 基金项目:国家自然科学基金(12172117)、河北大学高层次人才科研启动项目(521000981417)资助

损伤具有复杂性,其损伤机理及损伤演化规律尚不明确;因此,开展热老化后纤维增强复合材料的实验研究及损伤机理分析具有重要现实意义。

经过近几十年的发展,研究学者开展了大量关于纤维增强复合材料结构在极端环境下的力学性能研究。陈新文等^[4]的研究表明,当热老化温度低于环氧树脂的玻璃化转变温度低时,老化特征以失水为主;当热老化温度高于玻璃化转变温度时,则呈现出热氧化或热降解等老化特征。朱德举等^[5]通过热重分析仪量化阐明了玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GFRP)的热分解机制,发现GFRP筋的拉伸强度、极限应变、韧性和剪切强度均随着热老化温度的升高呈现出先上升后下降的趋势,而弹性模量变化不明显。李习习等^[6]结合红外光谱、动态热机械分析及扫描电镜研究了GFRP在90℃、135℃和180℃下的热老化行为。发现热老化前期GFRP发生残余交联,交联密度变大,力学性能上升;随着热老化时间的增加,高分子链发生断裂,树脂基体热解且出现脱粘破坏,加速了热老化行为,导致力学性能下降明显。关于热老化后GFRP复合材料力学性能的研究很多;然而,热老化时间、温度以及预制缺陷等因素对热老化后GFRP复合材料的损伤机理还有待进一步研究。

在结构健康监测领域,多种无损检测技术被应用于暴露于恶劣环境下而造成的结构损伤的检测。其中,声发射(acoustic emission, AE)技术可以实时监测试件损伤过程中产生的应力波,通过对不同的AE信号进行特征参数分析和聚类分析可以区分试件内部损伤与断裂机制^[7-8]。Vielle等^[9]使用声发射技术研究了碳纤维增强聚苯硫醚(PPS)在温度大于玻璃化转变温度下的损伤演化过程。声发射结果表明,在加载过程中,边缘效应会产生纤维基体脱粘和拔出损伤;温度有助于提高复合材料基体的延展性和韧性,但是仍会有横向裂纹的产生和扩展,并在破坏之前观察到有限的延性破坏。Sodoke等^[10]应用声发射技术分析了长期湿热老化对亚麻/环氧生物复合材料疲劳的影响,观察到声发射信号可以有效区分湿热老化条件下纤维/基体膨胀而造成的脱粘和纤维拔出损伤。

数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术可以捕捉力学加载过程中散斑的实时变化情况,对应变场和位移场信息的分析有助于揭示损伤机理及损伤过程演化^[11]。Almudaihesh等^[12]研究了老化聚合物状态的逐渐变化对CFRP复合材料整体性能的影响,利用DIC监测三点弯曲下应变,并与VCG拍摄图像进行对比,结果表明在最终故障之前试件已经发生分层损坏。此外,杜永刚等^[13]结合AE与DIC等无损检测技术并研究了含夹渣缺陷钢材的弯曲损伤行为。因此,AE与DIC相结合的互补技术是复合材料损伤监测的有效方法。

本文采用声发射与数字图像相关互补的无损检测技术研究不同热老化试件(120℃下热老化0、4、8和16d)的三点弯曲失效机制进行实时监测。利用K-means聚类方法

识别加载过程中的几种主要损伤模式,结合同步获取的位移场和应变场变化信息,成功揭示了预制缺陷和热老化时间对热老化后纤维增强复合材料力学行为和变形损伤机理的影响。

1 实验方法

1.1 试验材料与制备工艺

采用真空辅助树脂灌注工艺制备含8层单向玻璃纤维(ECW 600-1270, 600 g/m²)的GFRP试件,将4层单向玻璃纤维沿中心线裁断作为预制缺陷,如图1所示。实验选用环氧树脂(2511A)和固化剂(2511B)作为基体材料,确认真空环境密封良好后将环氧树脂和固化剂充分混合并进行真空灌注。在室温和120℃条件下分别固化48h和8h成型,最后使用小型水流切割机按照图1将复合材料层合板切割成60mm×20mm×3mm大小的试件。为了捕捉试件在弯曲载荷下的位移场和应变场信息,在试件弯曲表面喷黑白漆后获得随机分布的人工散斑。

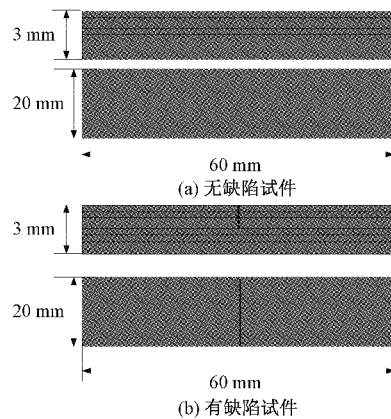


图1 GFRP试件几何尺寸图

有缺陷和无缺陷试件在电热恒温干燥箱进行热老化处理,升温速率为10℃/min,在120℃条件下进行周期为4、8和16d时间的热老化。为了保证温度环境恒定和复合材料试件受热均匀,铺设硅酸铝纤维棉层在电热恒温干燥箱中作为保温层,且每组试样测试个数超过6个以确保实验数据可靠性。在热老化完成后使用游标卡尺(精度为0.02mm)测量并计算试件体积,并使用天秤(检定分度值0.001g)测量试件重量。

1.2 实验装置及过程

根据GB/T 1449,以2mm/min的加载速率在万能力学试验机LD24上进行三点弯曲实验,同时利用声发射仪(DS-2A)和CMOS相机(MER-500-14U3M)进行实时监测,获得试件表面/内部损伤破坏的实时AE信号和散斑图像,实验测试系统如图2所示。AE信号采集阈值为40dB,采样频率为3MHz,两个声发射传感器对称放置,间距为50mm,并使用真空硅油脂将声发射传感器贴合在试件表面以保证声耦合良好。CMOS相机(分辨率为2592×

1 944 pixel) 每秒采集两次散斑图像, 并以 21 pixel/ms 的速度进行扫描。



图 2 三点弯曲实验测试系统

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

图 3 为 GFRP 试件弯曲强度保留率、弹性模量保留率随热老化时间变化曲线。由图 3 可知, 无缺陷试件的弯曲强度保留率持续增加, 而弹性模量保留率逐渐降低, 在热老化 8 d 后转变为上升趋势。热老化前期主要是交联效应造成界面间交联黏合, 使复合材料弯曲强度增加; 此外, 树脂中高分子链的热运动加剧, 环氧树脂间分子键合强度降低, 造成弹性模量降低^[14]。随着热老化继续进行到第 8 天, 环氧树脂中的水分持续挥发, 并逐渐代替交联效应占据主导地位^[15-16], 弹性模量大幅下降, 弯曲强度保留率持续增加。当热老化进行到第 16 天, 由于水分持续挥发, 水分子体积较小渗透扩散, 使基体发生增塑效应^[17], 弹性模量有些许回升。有预制缺陷试件弹性模量变化率呈现相似的趋势, 说明预制缺陷对于试件弹性模量的影响不大。含预制缺陷试件的弯曲强度保留率受热老化时间影响较大, 呈现出先上升后下降再上升的趋势。这是由于预制纤维断裂导致纤维承载能力减弱, 而热老化交联效应使得界面性能优化, 此时层合板弯曲强度保留率显著增加, 而热老化后期水分挥发对弯曲强度保留率影响不大, 弯曲强度变化率趋势与无预制缺陷试件相似。

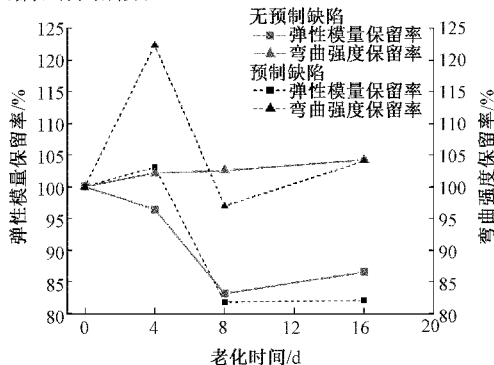
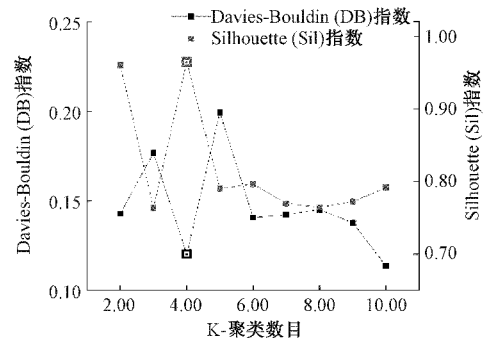


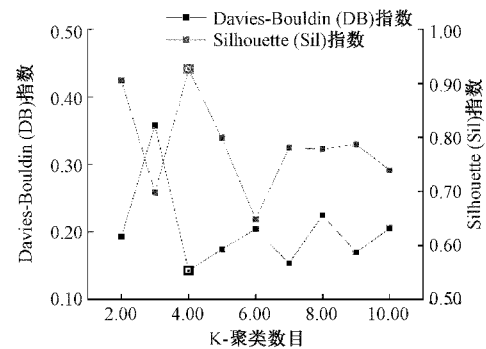
图 3 弯曲强度保留率和弹性模量保留率随热老化时间变化曲线

2.2 AE 信号分析

聚类分析方法可以对复合材料损伤过程中获得的 AE 信号进行进一步处理, 通过划分损伤模式来获得试件在各个阶段产生的内部损伤信息。采用 K 均值聚类分析方法对峰值频率、幅度和 RA 值进行聚类分析, 并引入 Sil (Silhouette) 与 DB (Davies-Bouldin) 指数确定最佳聚类数; Sil 最大值和 DB 最小值所对应的最佳聚类数 $k=4$, 如图 4 所示^[12]。Cluster1(C1): (低频)、Cluster2(C2): (中低频)、Cluster3(C3): (中高频) 和 Cluster4(C4): (高频) 分别代表着基体开裂、纤维/基体脱粘、分层和纤维断裂 4 种损伤模式。



(a) 无预制缺陷试件

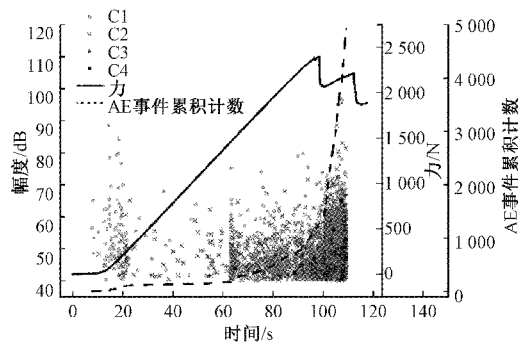


(b) 有预制缺陷试件

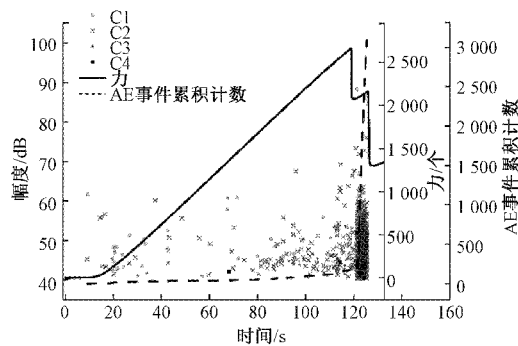
图 4 最佳聚类数评价

图 5 是无缺陷试件的载荷、AE 幅度、AE 事件累积计数和时间曲线。未老化的无缺陷试件损伤演化如图 5(a) 所示, 未老化试件前期主要以低频信号 C1 为主, 中期开始出现 C2 信号并持续到最后, 随着损伤累积出现 C3 与 C4 信号直至层合板失去承载能力。与图 5(a) 相比, 图 5(b) 中的 AE 信号集中在断裂失效后, 且加载过程中 C1 信号幅度值偏低、C2 信号数量少, 这种现象表明热老化 4 d 后的试件基体与纤维界面产生交联, GFRP 处于后固化阶段, 使基体与纤维的界面性能增强^[18]。图 5(c) 中 C2 信号聚集在初始加载阶段和载荷失效阶段, C3 与 C4 信号提前出现。即 1~8 d 的老化阶段中, 试件内部的微观演化依旧以交联为主但热氧化开始发生, 水分的挥发影响了界面的交联性, 导致纤维/基体脱粘发生提前, 但对最大失效载荷的影响不大。图 5(d) 中的 C1 信号集中在前期, C2 与 C3 信号则集

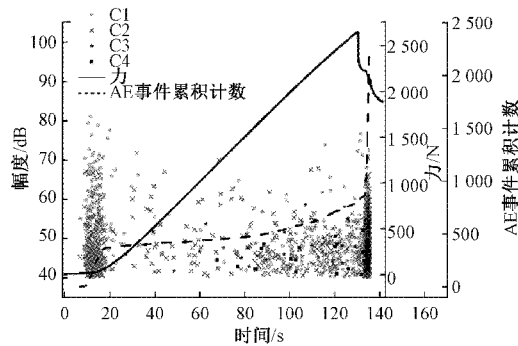
中在后期,后固化带来的交联效应持续减弱,热氧化分解导致基体界面间更易发生脱粘和分层损伤。



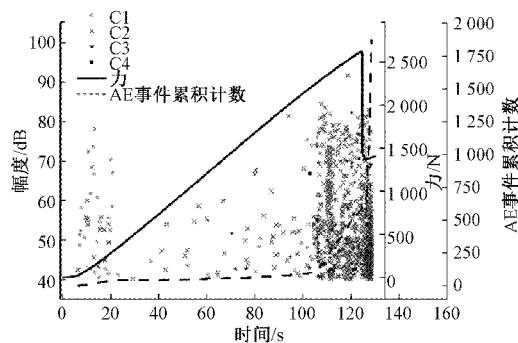
(a) 常温无预制缺陷试件



(b) 120 °C热老化4 d的无预制缺陷试件



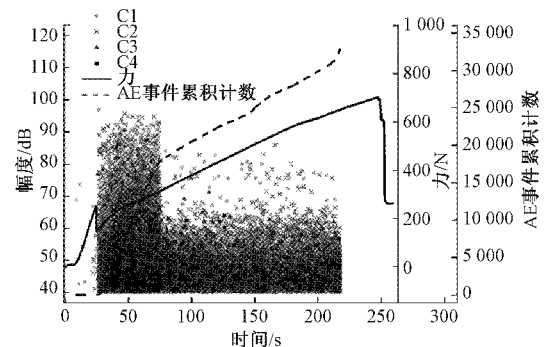
(c) 120 °C热老化8 d的无预制缺陷试件



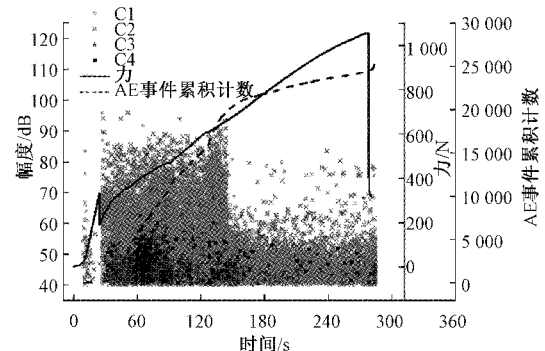
(d) 120 °C热老化16 d的无预制缺陷试件

图5 无缺陷试件的载荷、AE幅度、AE事件累积计数和时间曲线

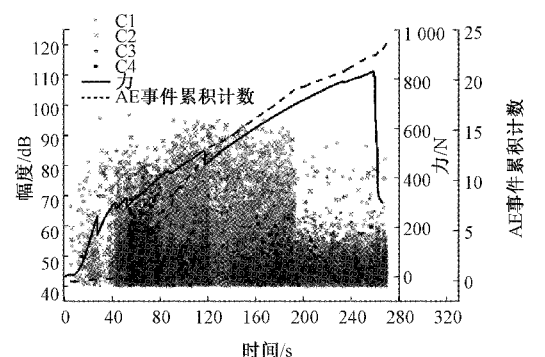
图6是有缺陷试件的载荷、AE幅度、AE事件累积计数和时间曲线。由图6(a)可知,AE事件累积计数曲线总体分为3个阶段:缓慢上升-急速上升-减速上升,有预制缺



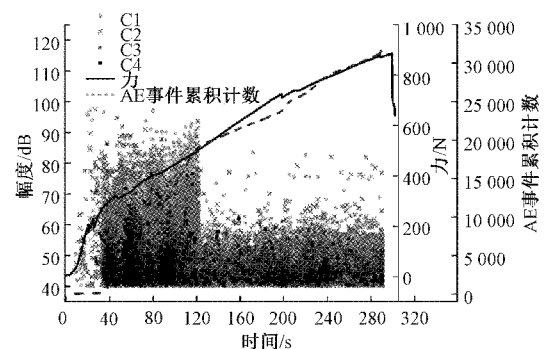
(a) 常温无预制缺陷试件



(b) 120 °C热老化4 d的无预制缺陷试件



(c) 120 °C热老化8 d的无预制缺陷试件



(d) 120 °C热老化16 d的无预制缺陷试件

图6 有预制缺陷试件的载荷、AE幅度、AE事件累积计数和时间曲线

陷试件在加载前期载荷力突降后出现大量高幅值 AE 信号,在断裂失效时的高幅值声发射信号较少,这表明预制纤维断裂缺陷处出现严重基体损伤,承载能力急速下降。与图 6(a)相比,图 6(b)在第 1 阶段内承载能力增加,C1、C2 信号多于未老化试件,表明试件内部受损伤更严重;第 2 阶段 C2 信号较多,AE 信号幅度超过 90 dB 的数量较少,且 C3 和 C4 信号也明显少于图 6(a)第 2 阶段;对比未老化试件与老化 4 d 试件,声发射事件数明显减少,这是由于后固化效应产生交联黏合,使界面间力学性能增强^[19]。图 6(c)第 1 阶段的 AE 信号持续增多,老化 8 d 后试件的力学曲线存在多次突降(分层损伤产生),第 1 阶段出现少量 C3、C4 信号,GFRP 整体性能变差。这是因为随着热老化的进行,交联效应不再占据主导地位;水分挥发使环氧树脂分子间键合强度降低,分层缺陷更易产生^[20],引起整体力学性能下降。与图 6(c)相比,图 6(d)中 C4 信号数量增多,C2 高幅度信号数量减少,此时水分挥发主导热老化进程。

利用 DIC 技术可以获得 GFRP 试件表面在加载过程中的变形场信息。本文中选取分层失效和断裂失效前的载荷范围(0~200 N 与 500~700 N)来研究 GFRP 试件的变形损伤和破坏行为。

图 7 为无预制缺陷热老化试件在不同载荷下的主应变场分布信息,随着热老化时间的增加,如图 7 所示,GFRP 试件在 500~700 N 载荷区间内的最大应变呈上升趋势。与图 7(a)相比,图 7(b)中试件表面应力变化率变化分布更加均匀,即老化 4 d 后试件基体传递载荷的能力得到改善;与图 5(a)中加载阶段 AE 信号数量少相对应,表明基体内部损伤较少。与图 7(b)相比,图 7(c)中老化 8 天后试件 0~200 N 载荷区间内的最大应变下降了 0.429%,500~700 N 最大应变增加了 1.571%,但应变分布仍然均匀,后固化效应改善界面间力学性能的效果逐渐降低。此外,老化 16 d 后试件基体中环氧树脂水分挥发,界面性能变差,GFRP 的载荷传递能力降低,引起应力集中,最大应变上升了 2.634%,如图 7(d)所示。结果表明,增加热老化时间可以在一定程度上改善 GFRP 的力学性能,与图 3 中逐渐上升的弯曲强度保留率曲线相对应。

与无缺陷试件不同,有缺陷试件在 0~200 N 和 500~700 N 的载荷范围内出现了不同程度的应力集中现象;由于预制纤维断裂的存在,使 GFRP 的承载性能大幅度下降,并直接影响最终失效模式。图 7(a)与图 8(a)对比观察到,在 0~200 N 阶段可以看到预制缺陷处出现大面积的应力集中;最大应变(26.926%)约等于相同载荷阶段无缺陷试件应力变化率的 5 倍,进而导致在预制缺陷处出现分层失效,如图 6(a)所示。在 500~700 N 阶段,由于 GFRP 试件受剪切力的影响,裂纹开始从分层处沿试件内部向两侧扩展,使预制缺陷部分基体逐渐从无缺陷部分剥离,内部损伤剧烈,出现大量高幅度信号,无缺陷部分基体成为主要承载对象,如图 6(a)所示。

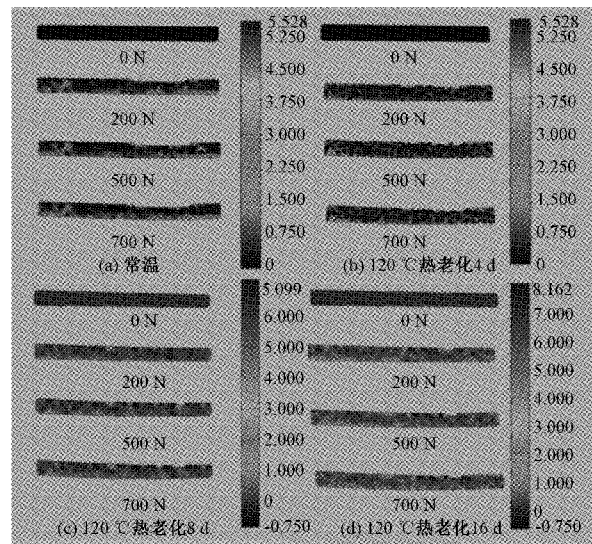


图 7 无缺陷热老化试件在不同载荷下的主应变场

如图 8(b)所示,在 0~200 N 阶段,热老化试件在预制缺陷处出现最大应变,最大处主应变为 13.206%,约是相同载荷阶段无缺陷试件应力变化率的 2 倍,变形场应变低于预制缺陷未老化试件。结果表明热老化对环氧树脂的后固化效应会优化 GFRP 整体性能,特别是加工工艺有缺陷的层合板。观察 500~700 N 阶段,与图 8(a)相比,热老化试件在分层处产生较严重裂纹扩展,且最大应变低于未老化试件,对应于图 6(b)中试件分层损伤信号少于图 6(a)。图 8(c)~(d)和图 8(b)相似,0~200 N 时最大应变集中点的应力变化率为 6.065%与 1.625%,与弯曲强度变化规律一致。图 8(c)在 500~700 N 阶段中分层缝隙变大,500 N 处存在高应变集中,且这个阶段应力变化率分布主要集中在分层处,环氧树脂传递应力变化率的效果明显低于图 8(b)。图 8(d)在 500~700 N 阶段中应力变化率进一步增加,应变集中范围扩散,分层裂纹更为严重。

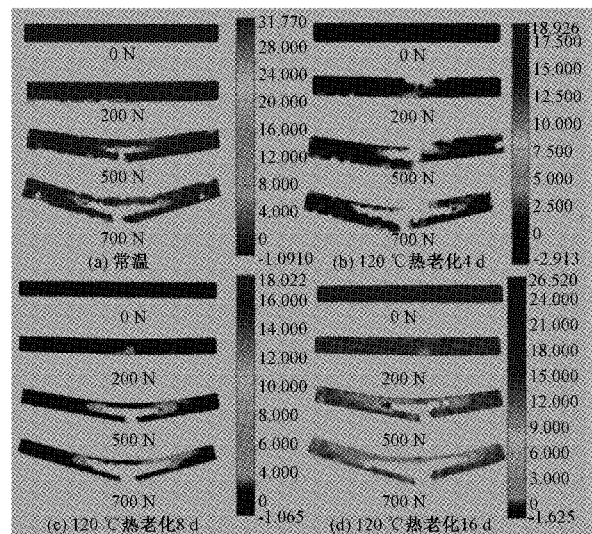


图 8 有预制缺陷热老化试件在不同载荷下的主应变场

综上分析可知,随着热老化时间的增加,预制缺陷试件在0~200 N阶段的最大应变由26.936%、13.206%、6.065%降低至1.625%,说明热老化时间对试件预制缺陷处应力变化率集中的影响逐渐变小。500~700 N阶段,最大应变变化趋势与0~200 N阶段相似;有预制缺陷未热老化试件更易产生分层损伤,说明热老化造成的后固化效应在一定程度上可以抵挡分层的产生,与力学分析和AE分析结果一致。

3 结 论

本文介绍了一项关于热老化对GFRP板材影响的综合实验研究,该研究通过AE与DIC结合的无损检测技术,研究热老化时间(120℃下热老化0、4、8和16 d)对GFRP的内部演化行为的影响,并进一步分析预制缺陷对热老化后复合材料的纤维与基体界面间性能的影响。

对于无预制缺陷试件,当热老化时间为4 d时,热老化现象以纤维基体界面间交联效应为主,C2信号数量减少且幅度降低,C3信号大量减少;弯曲变形测量结果显示应变场变化均匀,与未老化试件相比,试件弯曲强度上升,弹性模量下降。随着热老化时间增加到8和16 d,树脂基体软化,弹性模量显著下降,水分挥发逐渐代替交联效应占据主导地位,界面间改性减弱。然而,环氧树脂中水分挥发导致复合材料中孔隙减少,试件弯曲强度上升,此时C2信号明显减少,C3和C4信号增多,同时变形场中最大应变较热老化4 d试件增多。

对于有预制缺陷试件,热老化4 d后试件的C3和C4信号最少,且幅度大多低于60 dB,声发射信号数量少于预制缺陷未老化试件;弯曲变形测量结果显示其最大应变低于预制缺陷未老化试件,且后固化效应作用效果较明显。随着热老化时间的增加,C3和C4信号数量增多且提前出现;变形场分析显示最大应变高于热老化4 d的,但是低于未老化试件。

总的来说,预制缺陷会导致GFRP在服役中出现应力集中,从而导致结构失效;热老化可以降低预制缺陷处应力集中现象,改善预制缺陷处的界面性能。AE信号分析结果可以揭示其内部损伤演化过程,AE技术与DIC技术结合可以有效揭示缺陷和热老化时间对GFRP内部损伤机理的影响规律,本文中提供的大量实验数据可用于校准合适的热老化后GFRP模型,在GFRP工程应用中对于考虑材料退化的提供适当的建议,但是对于热老化后GFRP内部损伤演化的可视化及其定量分析仍需进一步研究。

参考文献

[1] BAZLI M, ASHRAFI H, JAFARI A, et al. Effect of thickness and reinforcement configuration on flexural and impact behaviour of GFRP laminates after exposure to elevated temperatures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 157: 76-99.

[2] BAZLI M, ASHRAFI H, OSKOEI A V. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles[J]. *Composites Part B*, 2016, 99: 203-215.

[3] ZHANG C, BINIENDA W K, MORSCHER G N, et al. Experimental and FEM study of thermal cycling induced microcracking in carbon/epoxy triaxial braided composites[J]. *Composites: Part A*, 2013, 46:34-44.

[4] 陈新文, 李晓骏, 许凤和. 碳纤维增强树脂复合材料的热失重特性研究[J]. *航空材料学报*, 2000, 20(3): 124-133.

[5] 朱德举, 徐旭峰, 郭帅成, 等. 高温后玄武岩和玻璃纤维增强复合材料筋的力学性能[J]. *湖南大学学报*, 2021, 48(7): 151-159.

[6] 李习习, 王涛, 候锐钢. 玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料的热老化机理[J]. *热固性树脂*, 2020, 35(1): 49-53.

[7] 齐添添, 陈尧, 李昕, 等. 基于时间反转的玻璃钢板材声发射源定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 208-217.

[8] 周伟, 孙诗茹, 冯艳娜, 等. 风电叶片复合材料拉伸损伤破坏声发射行为[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(2): 240-246.

[9] VIEILLE B, CHABCHOUB M, BOUSCARRAT D, et al. A fracture mechanics approach using acoustic emission technique to investigate damage evolution in woven-ply thermoplastic structures at temperatures higher than glass transition temperature [J]. *Composites Part B*, 2017, 116: 340-351.

[10] SODOKE F K, TOUBAL L, LAPERRIÈRE L. Hygrothermal effects on fatigue behavior of quasi-isotropic flax/epoxy composites using principal component analysis [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 94:62-70.

[11] 陈登旭, 刘吉, 武锦辉, 等. 基于自阈值粒子群算法和爬山算法的DIC形变分析[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(5):11-16.

[12] ALMUDAIHESH F, GRIGG S, HOLFORD K M, et al. An assessment of the effect of progressive water absorption on the interlaminar strength of unidirectional carbon/epoxy composites using acoustic emission[J]. *Sensors*, 2021, 21(13):4351.

[13] 杜永刚, 周伟, 刘朔, 等. 含夹渣缺陷Q245R钢的声发射特性研究和DIC研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(18):1-6.

[14] 王国建, 孙耀宁, 蒋万乐, 等. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的热老化性能[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(10): 87-107.

[15] 龚亮, 薛利利. 热氧老化对三向正交碳/玻璃纤维/双

- 马复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(10):144-155.
- [16] SHIN P S, KIM J H, PARK H S, et al. Evaluation of thermally-aged carbon fiber/epoxy composites using acoustic emission, electrical resistance and thermogram[J]. Composite Structures, 2018, 196: 21-29.
- [17] 谢可勇, 李晖, 孙岩, 等. 湿热老化对纤维增强树脂基复合材料性能的影响及其机理[J]. 机械工程材料, 2014, 38(8):1-5.
- [18] MOUZAKIS D E, DIMOGIANOPOULOS D G. Acoustic emission detection of damage induced by simulated environmental conditioning in carbon fiber reinforced composites [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210:422-428.
- [19] MEHRABIAN M, BOUKHILIR. 3D-DIC strain field measurements in bolted and hybrid bolted-bonded joints of woven carbon-epoxy composites [J]. Composites Part B:Engineering, 2021,218:108875.
- [20] 韩耀璋, 李进, 张佃平, 等. 原位在线监测多因素协同对玻璃纤维/环氧树脂复合材料热老化性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1531-1538.

作者简介

郭雪吟, 硕士, 主要研究方向为热老化后复合材料实验力学及无损检测。

E-mail:1219233572@qq.com

周伟(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为复合材料实验力学及无损检测技术。

E-mail:zhouwcihy@126.com