

热固性/热塑性复合材料分层损伤红外热波检测能力评估

杨正伟^{1,2}, 赵志彬¹, 高建国³, 寇光杰¹, 张 炜^{1*}

- (1. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025;
2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 主动红外热成像技术在不同基体复合材料分层损伤中的检测能力尚未被评估。文中通过设计制作两种典型热固性/热塑性复合材料层压板, 分别采用脉冲红外热成像、超声红外热成像、超声 C 扫描三种方法对不同冲击能量下的分层损伤进行了检测研究。以超声 C 扫描结果为参照, 对比了两种红外热成像技术的检测结果, 同时针对热图序列损伤区域的阈值分割提取开发了基于图像强度值相似性理论的区域生长算法。损伤的定量识别结果表明: 脉冲热成像对热固性复合材料的分层损伤检测效果较好, 但其不适用于热塑性复合材料损伤检测, 超声热成像对于两类复合材料分层损伤均有较好的检测能力且整体检测精度优于脉冲热成像。期间对不同损伤检测效果的深层次机理进行了分析, 并提出了分别针对两种基体类型复合材料的红外热成像技术评估流程和标准。

关键词: 热塑性复合材料; 热固性复合材料; 分层损伤; 主动红外热成像; 检测能力
中图分类号: V45; TB33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210304

Evaluation of infrared thermal wave detection capability for delamination damage of thermosetting/thermoplastic composites

Yang Zhengwei^{1,2}, Zhao Zhibin¹, Gao Jianguo³, Kou Guangjie¹, Zhang Wei^{1*}

- (1. School of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The ability of active infrared thermography to detect delamination damage in different matrix composites has not been evaluated. Two typical thermosetting/thermoplastic composite laminates were designed and manufactured in this paper. The three methods of pulse infrared thermography, ultrasonic infrared thermography, and ultrasonic C-scan were used to detect and study the delamination damage under different impact energy. The scanning results of ultrasonic C-scan were for reference, and the detection results of the two infrared thermography were compared. At the same time, a region growth algorithm based on the similarity theory of image intensity value was developed for the threshold segmentation and extraction of damaged regions of heat map sequence. Accuracy and quantitative damage identification results show that pulse infrared thermography is effective in detecting layered damage of thermoset composites, but it is not suitable for damage detection of thermoplastic composites. Ultrasonic thermal thermography is effective for both types of delamination damage of composites. It has better detection capability and overall detection accuracy is better than pulse infrared

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (92060106); 国家自然科学基金 (51575516, 52075541)

作者简介: 杨正伟, 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事复合材料红外热波检测方面的研究。

通讯作者: 张炜, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器结构检测与故障诊断方面的研究。

thermography. The deep mechanism of different damage detection effects was analyzed, and the evaluation process and standard of infrared thermography for the two matrix types of composites were proposed.

Key words: thermoplastic composites; thermoset composites; delamination damage; active infrared thermography; detection capability

0 引言

长期以来热固性复合材料由于其轻质、高比强度、高比模量等特点而被广泛应用于航空航天领域^[1-3],但近几年,热塑性复合材料也因可回收、耐冲击、高断裂韧性等优势在工程应用中展现出了巨大潜力^[4]。与金属材料不同的是,复合材料对冲击载荷十分敏感,往往轻微的冲击也极有可能造成复合材料结构的目视不可见分层损伤,降低其强度的同时影响飞行器整体可靠性与安全性^[5-6]。因此,针对复合材料冲击损伤的无损检测评估已成为目前无损检测领域的研究热点。得益于高性能红外热像仪的出现,主动红外热成像^[7-8]作为一种新型无损检测技术迅速发展起来,并因其响应速度快,非接触、检测结果直观等特点受到了国内外学者的广泛关注^[9-13]。

目前,主动红外热成像技术的热激励方式繁杂多样(包括脉冲,超声,锁相,涡流等),总体可分为光学和机械两大类^[14],而其中又分别要以脉冲和超声热激励应用范围最广,技术也最为成熟^[15-16]。自 20 世纪 80 年代这两种方法先后被提出后^[17-18],学者们对其在复合材料中的应用进行了大量探索。Castanedo^[19]等将超声热成像和脉冲热成像应用在 GLARE 复合材料结构当中,验证了二者对于分层检测的适用性。Gaudenzi 等^[20]运用超声和脉冲热成像对热固性 CFRP 低速冲击分层损伤进行检测,通过与超声相控阵技术对比后证明了两种主动红外热成像技术的有效性,但同时也指出热成像检测结果远低于实际损伤面积。Li^[21]等进行了热固性 CFRP 的脉冲和超声热成像检测试验和数值模拟,发现脉冲热成像适用于分层损伤检测,而超声热成像对于不同损伤模式的检测效果更有层次性,同时对各损伤模式在主动红外热成像中的表征进行了总结。之后,Chulkov^[22]等通过热固性复合材料脉冲和超声热成像检测试验得出了与 Li 相近的结论,认为脉冲热成像在检测分层损伤时的优势更大,但其提出了一种不同红外热成像技术检测热图的数据融合方法提高了红外热成像检测对复合材料损

伤模式的鉴别能力。之后,Pracht^[23]等使用超声和脉冲热成像对热固性芳族聚酰胺复合材料的分层缺陷进行检测,得出了与 Li 和 Chulkov 不同的结论,其发现超声热成像检测结果更加明显,与脉冲热成像相比超声热成像对于深度较大的缺陷有着更好的检测效果,同时指出了脉冲热成像由于采用全局加热而导致的噪点过多问题,但其工作并未对超声红外热成像检测深度较高的原因进行深入分析。Quattrocchi^[24]等对比研究了主动红外热成像(超声与锁相)与空气耦合超声波检测技术在热固性聚酯树脂 GFRP 中分层缺陷检测中的能力,发现主动红外热成像技术在检测缺陷深度和尺寸方面均具有一定限制,但在检测速度上具有较大优势,但由于其研究是通过插入聚合物来模拟缺陷,与实际冲击过程带来的分层损伤相比有所简化,因此所得结论具有一定局限性。由上述可知,之前的研究主要集中于热固性复合材料不同结构损伤检测的适用性判别和损伤模式评估上,而关于其在热塑性复合材料损伤检测的应用研究相对较少,因此分别针对热固性与热塑性复合材料的主动红外热成像检测策略的提出也势在必行。

鉴于此,文中设计制作了目前典型的两种热固性/热塑性复合材料层压板-碳纤维增强环氧树脂复合材料与玻璃纤维增强聚丙烯复合材料,通过低速冲击试验引入两种能量水平(15 J 与 30 J)的分层损伤,在此基础上,分别采用超声 C 扫描和脉冲、超声两种主动红外热成像技术对冲击后的试件进行了无损检测试验,通过以超声 C 扫描结果为参照,对比了两种红外热成像技术的定量评估结果,期间针对热图序列损伤区域的阈值分割提取提开发了基于图像强度值相似性理论的区域生长算法,并为热固性和热塑性复合材料分别提出了相应的损伤评估方法及流程,以评估两种红外热成像技术在不同基体类型复合材料中的损伤检测能力。文中研究可扩展主动红外热成像技术在复合材料损伤检测领域的横向应用,同时为工程测试人员的操作使用提供一定参考。

1 试验方法

复合材料层压板低速冲击损伤的脉冲与超声红

外热波成像检测试验及检测热图处理流程可分为以下步骤,如图 1 所示。

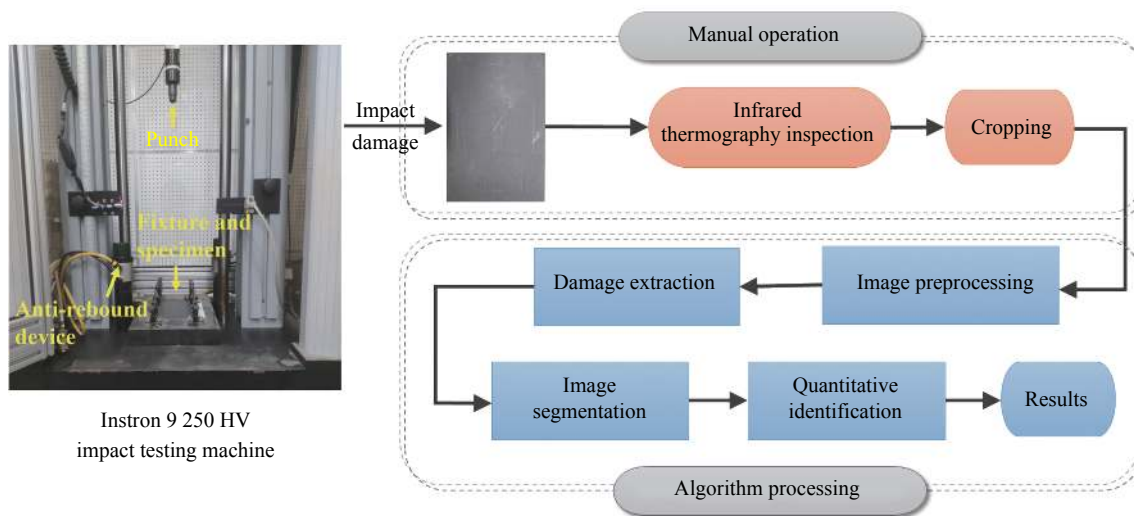


图 1 检测试验及热图处理流程图

Fig.1 Test and thermal map processing flow chart

1.1 试样制备

依据 ASTM D7136/D 7136M-12 标准制备了碳纤维增强环氧树脂和玻璃纤维增强聚丙烯复合材料层压板试件,试件铺层均为 [45/0/-45/90]_{4S} 交叉铺层,试件规格 150 mm×100 mm×4.8 mm。采用 Rapid Scan 2 型滚轮式超声相控阵探伤仪对试件进行出厂检测,结果显示试件表面质量良好,内部无分层及夹杂等缺陷。两类试件尺寸图及实物图如图 2 所示。

号为 1#-4#,依据 ASTM D7136 标准进行冲击试验。采用图 1 所示的 Instron Dynatup 9250 HV 落锤冲击试验机进行低速冲击试验,冲击器质量为 12.527 kg,锤头选用直径 16 mm 半球形锤头,另配有 150 mm×100 mm 的敞开窗口的相框夹具用于放置试件,夹具周围的四个橡胶夹头用来固定试件以防止试件冲击过程中的震颤,同时试验机配有气动回弹装置防冲头二次冲击。

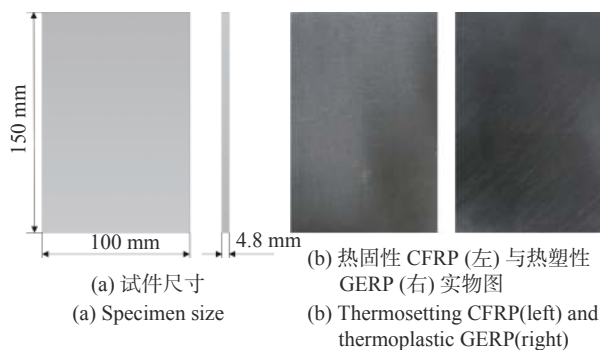


图 2 试验所用试件

Fig.2 Testing specimen

分别对两类层压板 1#-4#试件进行两种能量水平 (15 J 与 30 J) 的冲击试验,试验过程中通过改变冲击器的高度来调整冲击能量。观察试件冲击过程中各响应参数与时间的关系曲线 (以 2#试件为例),如图 3 所示,冲击过程可分为冲头的自由下落、冲头与试件的相互挤压和冲头回弹三个阶段。在自由下落阶段,冲击器自由落下,其势能转化为动能,当与试件接触的前一刻其速度最大;在挤压阶段,冲头开始接触并挤压试件,导致其速度开始降低,冲头与试件之间的接触力开始增加,冲头动能逐渐转化为冲击能量,当冲击过程持续一段时间后,速度下降至 0,接触力达到最大,动能全部转化为冲击能,在此期间冲击力-时间曲线的波动意味着试件损伤的生成,而曲线的第一次骤降被认为是大面积分层的开始,称之为赫兹破坏^[25-26];

1.2 低速冲击试验

从上述制备的两类试件中分别选取 2 块,依次编

在弹回阶段,由于试件本身的弹性恢复能力,冲头被弹回,冲头与试件之间开始脱离,接触力逐渐降低,弹回动能增加,当冲头与试件完全脱离的一刻,二者接触力为 0,弹回速度达到最大,至此冲击过程完成。对冲击后的试件进行超声 C 扫检测,分层损伤结果如图 4 所示,分层面积分别为 1 077.72 mm², 1 523.96 mm², 831.56 mm² 和 1 281.74 mm²。

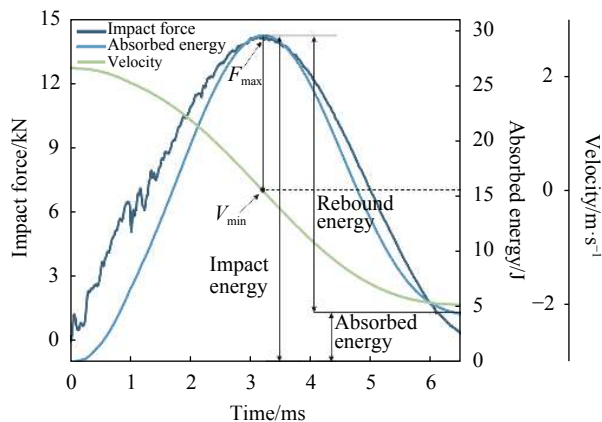


图 3 冲击响应参数随时间的动态变化曲线
Fig.3 Dynamic curve of impact response parameters with time

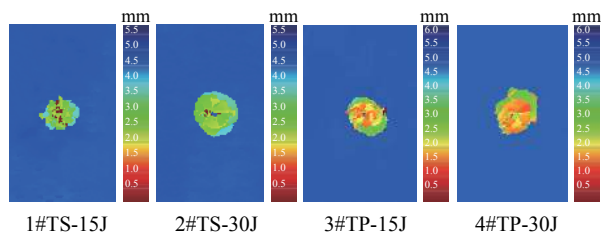


图 4 1#-4#试件超声 C 扫检测结果
Fig.4 Test results of 1#-4# specimen by ultrasonic C-scan

1.3 红外热波检测试验

主动红外热成像检测系统主要包括三个部分:热激励源、红外热像仪和计算机控制处理系统,其检测原理如图 5 所示。通过脉冲或超声热激励源对被测试件施加可控的热激励源,当热流在试件内部传播,由于损伤的热属性差异,导致热量在损伤处形成累积,从而改变试件表面的温度场,采用红外热像仪监测这种变化的温度场,可以实现对试件内部损伤的判读。

采用课题组自主开发的脉冲和超声激励热成像检测系统进行主动热成像检测试验,如图 6 所示,两试验共用红外热像仪和工控计算机。红外热像仪采用德国 InfraTec 公司制造的 Vhr 680 型红外热像仪,

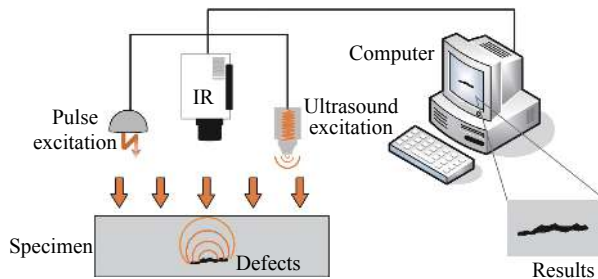
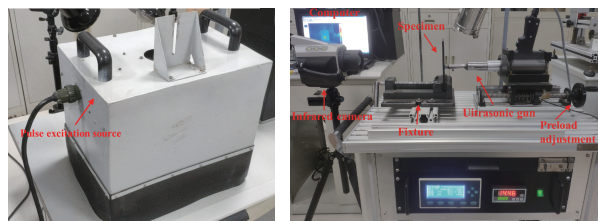


图 5 红外热波检测原理图
Fig.5 Infrared thermal wave detection schematic diagram

其可探测红外光谱范围为 7.5~14 μm,可测量温度范围为 -40~+1 200 °C,测量精度为 ±2% (<0 或 >100 °C) 或 ±1.5 °C (0~100 °C),最大采集频率 50 Hz,试验中也均设置为 50 Hz;脉冲热激励源由两只并行排列的自然冷却式线性脉冲闪光灯组成,可释放宽度为 2 ms 的高能瞬时脉冲,最大输出能量为 4 800 J,蓄能时间间隔为 5 s;超声热激励源采用诺威尔公司生产的 UST-200 超声枪,其输出功率为 1 kW,频率为 20 kHz,激励时间为 200 ms。由于医用胶布在有效保护试件的同时还能削弱驻波共振现象,提高热图损伤对比度,因此采用其作为超声热成像检测耦合剂。



(a) 脉冲激励热成像设备 (b) 超声激励热成像设备
(a) Pulse excitation equipment (b) Ultrasound excitation equipment

图 6 主动红外热波检测系统

Fig.6 Active infrared thermal wave detection system

1.3.1 脉冲红外热波检测结果

依据上述检测参数对 1#-4#试件进行了脉冲热成像检测试验。检测结果如图 7~图 10 所示,图中亮度较暗的区域为非损伤区域,较亮的中心区域为冲击损伤区域。从图中可以看出,在脉冲激励触发之后,试件首先被全局加热,当热流向层压板内部传播遇到损伤时,损伤会阻碍其传播左右从而导致损伤处热量堆积,温度下降趋势变缓,而在无损伤区域,由于无任何阻碍,热流传播速度较快,温度趋势不变,由此产生了表面温差,以 1#试件为例,整个过程的温度变化示意图见图 11。

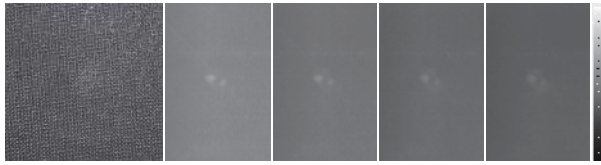


图 7 1#试件 (TS-15J) 脉冲热波检测结果

Fig.7 Test results of 1# specimen (TS-15J) by pulse thermography

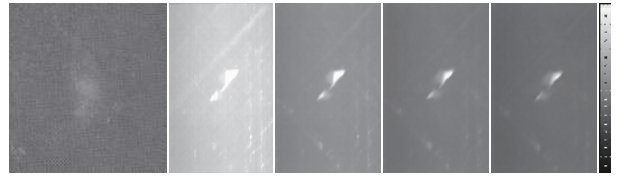


图 9 2#试件 (TS-30J) 脉冲热波检测结果

Fig.9 Test results of 2# specimen (TS-30J) by pulse thermography



图 8 3#试件 (TP-15J) 脉冲热波检测结果

Fig.8 Test results of 3# specimen (TP-15J) by pulse thermography

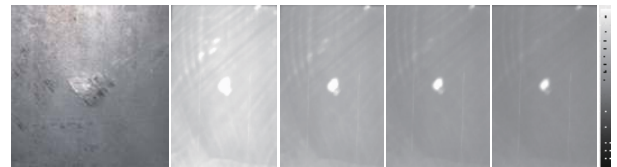


图 10 4#试件 (TP-30J) 脉冲热波检测结果

Fig.10 Test results of 4# specimen (TP-30J) by pulse thermography

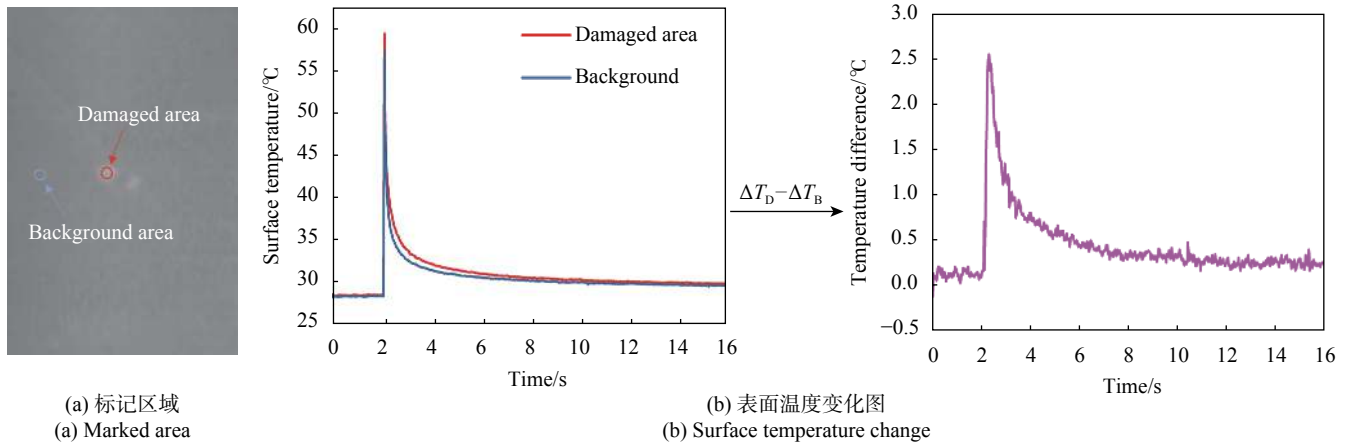


图 11 脉冲激励后 1#试件表面温度变化

Fig.11 Temperature change of 1# specimen after pulse excitation

1.3.2 超声红外热波检测结果

关于超声红外热成像,当被测试件收到超声激励后,由于损伤内表面摩擦、塑性变形、粘弹性阻尼效应等因素影响,使振动的机械能转换为热能,从而改变试件表面的温度场。Renshaw^[27]等指出摩擦生热主要位于损伤内表面之间的区域,是最主要的生热形式。四块试件的超声热成像检测结果如图 12~15 所示。与上述脉冲热成像现象类似,亮度较暗的区域

为非损伤区域,较亮的区域为损伤区域。

在激励瞬间,各试件靠近表面的分层损伤经不断

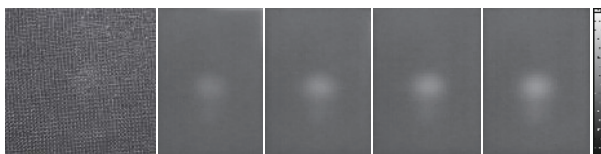


图 12 1#试件 (TS-15J) 超声热波检测结果

Fig.12 Test results of 1# specimen (TS-15J) by ultrasonic thermalgraphy

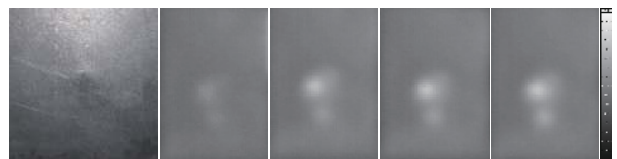


图 13 3#试件 (TP-15J) 超声热波检测结果

Fig.13 Test results of 3# specimen (TP-15J) by ultrasonic thermalgraphy

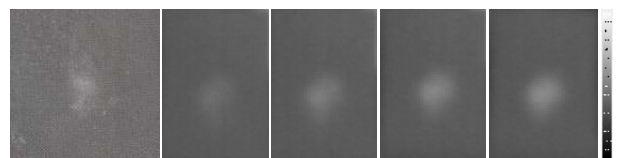


图 14 2#试件 (TS-30J) 超声热波检测结果

Fig.14 Test results of 2# specimen (TS-30J) by ultrasonic thermalgraphy

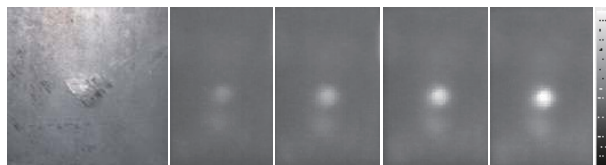


图 15 4#试件 (TP-30J) 超声热波检测结果

Fig.15 Test results of 4# specimen (TP-30J) by ultrasonic thermalgraphy
摩擦后在表面呈现一块非规则圆形热斑,随着激励的持续,摩擦作用不断增强,远离试件的分层损伤摩擦生热后的温度不断传递到试件表层,因此观察到的热斑面积和亮度不断增加,且热量耗散速度较慢。另外超声枪与试件的接触区域由于超声刺激作用也会产生较高的温度,称之为激励热区。

关于不同试件在超声激励下的时序变化特征,为消除环境干扰和时间表面特性影响,利用最大表面温差来分析不同试件在超声激励下的表面温度的时序变化特征,如公式 (1) 所示:

$$\Delta T_t^{\max} = T_t^{d\max} - T_t^b \quad (1)$$

式中: ΔT_t^{\max} 为 t 时刻试件表面损伤区域温度最大值 $T_t^{d\max}$ 与背景区域温度平均值 T_t^b 的差值。利用公式 (1), 得到 1#-4# 的最大表面温差-时间曲线如图 16(b) 所示。

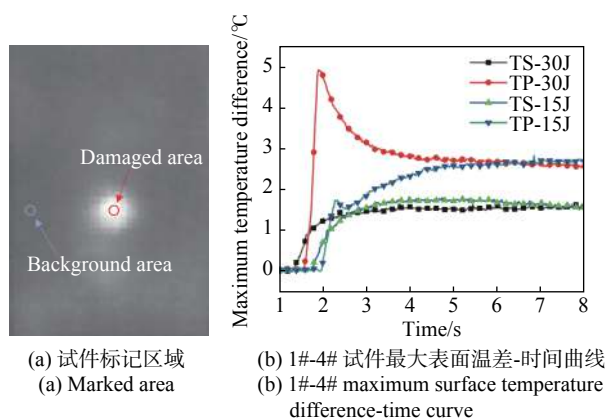


图 16 1#-4#试件的时序变化特征

Fig.16 Time sequence change characteristics of 1#-4# specimen

从图 16 中可以看出, TP 试件在超声激励下的最大表面温差整体要大于 TS 试件,这与图 12-15 中的热图结果相一致。这可能是在超声激励时 TP 试件良好的韧性使得超声枪在激励时与试件贴合程度更高,超声波的传递效率增加使得损伤区域之间的摩擦作用增加,生热量增高,分层损伤越明显,而 TS 试件由于表面刚性较大从而与超声枪激励时的贴合度不高,

导致其检测效果相比于 TP 试件不够明显。

2 检测能力评估

要实现主动红外热波成像无损检测能力的有效评估,关键在于能否实现损伤面积参数的定量识别。因此,为准确解读检测热图中所含的损伤信息,需要采用有效的数据处理和数字图像处理方法对热图进行处理和分析,从而实现损伤参数的定量识别。为此,从图像预处理、损伤提取及阈值分割、损伤定量识别三个步骤对热图进行处理,下面以 1#试件为例。

2.1 图像预处理

为提高热斑损伤阈值分割的稳健性,首先对图像进行预处理,具体可分为如下两步:一是先对热成像检测热图序列进行自适应对比度增强 (CLAHE),突出损伤边缘,提高损伤边缘对比度,放大损伤与背景之间的像素差异^[28-29];二是通过高斯滤波法消除图像噪声,改善图像的清晰度和视觉效果^[30],其原理如公式 (2) 所示:

$$I_g(x, y) = \frac{\sum_{(i,j) \in n_{x,y}} n_d(i, j) I(i, j)}{\sum_{(i,j) \in n_{x,y}} n_d(i, j)} \quad (2)$$

式中: $n_{x,y}$ 表示中心像素 (x, y) 的 $M \times M$ (M 为奇数) 大小的邻域; n_d 为相似度权重因子。

2.2 损伤提取及阈值分割

经上述热图预处理操作后,热图质量提高的同时突出了分层损伤的特征信息,但要实现损伤的定量评估,还需要将损伤从热图中分割提取出来。图像分割算法一般基于强度值的两个基本属性:不连续性和相似性。前者是基于强度水平的不连续变化,如阈值分割和边缘检测,但由于严重依赖于高阶偏微分方程和滤波器操作使其不易于进行热图损伤区域提取。而后者即图像强度值的相似性属性使其可以有效区别背景区域和损伤区域,因此,文中提出了基于图像强度值相似性理论的红外热图生长区域算法。

通过分析热图序列,发现损伤区域热斑灰度差值变化较小,而损伤区域热斑与背景区域相交边界处周围灰度差值变化较大。假设种子点与其四连通区域灰度值为 f 和 δ , 种子点灰度值与其四连通区域之间的强度值之差为 d 。三者关系如公式 (3) 所示:

$$d = f(x, y) - \delta_i \quad (3)$$

设为区域生长的基本停止参数,即生长因子。当种子点与四连通区域的灰度差值小于 δ_{lim} 时,生长区域以种子点为中心不断向外扩张,每扩张一次判断其生长因子条件,若不满足则以其四连通区域为新的种子点并继续生长,直至损伤区域被全部提取,当种子点与四连通区域的灰度值大于 δ_{lim} 时,即所在区域达到损伤区域热斑与背景区域相交边界处时,种子点停止生长。其原理如公式(4)和图17所示。

$$img(x,y) = \begin{cases} 1, d_{min} < \delta_{lim} \\ 0, d_{min} \geq \delta_{lim} \end{cases} \quad (4)$$

以1#为例,脉冲和超声红外热成像检测损伤区域提取和分割后的图像结果如图18和图19所示。由结果可知该算法损伤区域分割效果较好,非常适用于红外热图序列的损伤提取。

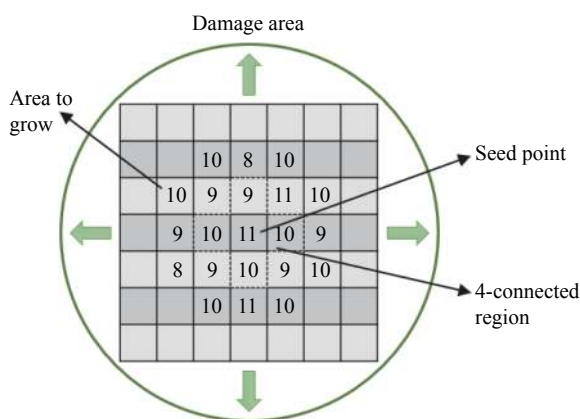


图 17 区域生长算法原理图

Fig.17 Schematic diagram of region growing algorithm

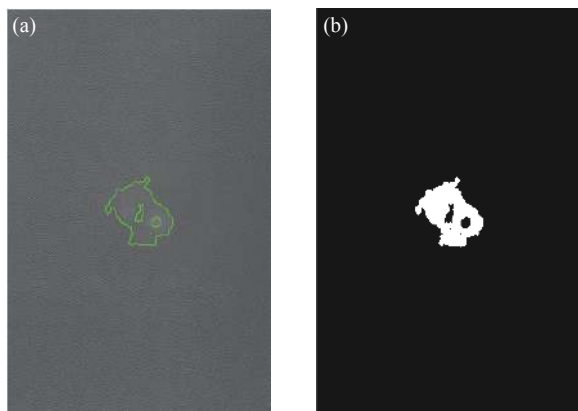


图 18 脉冲红外检测热图损伤提取与分割结果

Fig.18 Extraction and segmentation results of heat image damage by pulse infrared detection

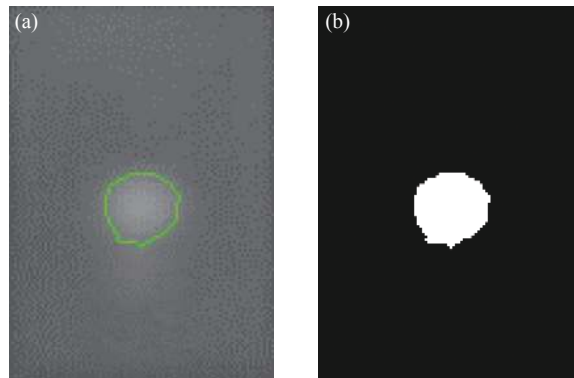


图 19 超声红外检测热图损伤提取与分割结果

Fig.19 Extraction and segmentation results of heat image damage by pulse ultrasonic infrared detection

2.3 损伤定量识别

试件中的损伤信息是根据表面温度的差异性反映出来的,这为利用原始热图中的温度数据获取损伤参数提供了依据。此外,由上述热图处理方法研究可知,热图经过分割后成为二值图像,即损伤区域的像素值为1,而非损伤区域的像素值为0,这为利用二值链码技术确定损伤参数奠定了基础。

试件中的实际损伤面积可以根据边界内部的像素点进行换算得到^[31]。设试件在热图中的面积为 S_i ,试件的实际面积为 $S_d(S_s=150\text{ mm}\times 100\text{ mm})$,则可以根据公式(5)换算得到实际的损伤面积 S 。

$$S = \frac{S_d}{S_i} \times S_s \quad (5)$$

式中: $S_d = \sum_{(i,j \in R)} 1$,为试件在热图中的损伤区域面积。通过此步骤可以算出1#-4#试件在脉冲和超声热成像下所检测到的实际损伤面积,从而为两项技术在热固性/热塑性复合材料损伤检测中的定量分析和能力评估奠定基础。

2.4 讨论与误差分析

通过上述定量识别算法计算出各试件损伤检测结果,并将计算结果与超声C扫描结果进行对比得到相对误差,如表1所示。

由表1可知,对于热固性CFRP,脉冲红外热成像相对于超声C扫描方法分层损伤检测结果误差在30%以内,超声红外热成像相对于超声C扫描误差在5%以内。对于热塑性GFRP,脉冲红外热成像对其损伤检测效果较差,与超声C扫描相对误差最高达到了92.3%,而超声红外热成像相对于超声C扫描误差

表 1 脉冲/超声检测方法下 TP/TS 试件分层损伤面积及其相对误差

Tab.1 The delamination damage area and its relative error of TP/TS specimens under pulse/ultrasonic detection method

Sample number	Damage area/mm ²			Relative error	
	Pulse	Ultrasonic	C-scanning	Pulse	Ultrasonic
1#	875.29	1 048.16	1 077.72	18.7%	2.74%
2#	1 068.70	1 476.83	1 523.96	29.8%	3.09%
3#	63.75	791.69	831.56	92.3%	4.79%
4#	209.65	1 084.70	1 281.74	83.6%	15.3%

在 20% 以内。而且发现对于冲击能量较小的试件, 损伤面积计算值的相对误差就越小。由此可知: 脉冲红外热成像对于热固性复合材料低速冲击分层损伤的检测能力较好, 但并不适用于热塑性复合材料低速冲击分层损伤检测; 而超声红外热成像对于两种类型复合材料分层损伤都具有较好的检测能力, 且检测精度整体优于脉冲红外热成像。

3 结 论

文中对不同冲击能量下的典型热固性/热塑性层压板试件分层损伤开展了脉冲与超声红外热成像检测试验研究, 检测结果表明: 脉冲红外热成像对热固性复合材料的分层损伤检测效果较好但不适用于热塑性复合材料分层损伤检测, 超声红外热成像对于两类复合材料分层损伤均有较好的检测能力。

为评估两种红外热成像技术对复合材料分层损伤的检测能力, 提出了评估流程和标准, 开发的基于图像强度值相似性理论的区域生长算法为后续损伤定量识别奠定了基础。通过定量识别结果可知: 对于热固性复合材料, 脉冲红外热成像检测误差在 30% 以内, 超声红外热成像检测误差在 5% 以内; 对于热塑性复合材料, 脉冲红外热成像检测误差高达 92%, 而超声红外热成像检测误差在 20% 以内。超声热成像检测对于复合材料分层损伤的检测精度要优于脉冲热成像, 但由于超声红外热成像检测需要不断更换耦合剂, 因此整体检测速度较脉冲热成像要低。在实际复合材料结构检测中, 可利用脉冲热成像速度优势, 先用其进行初检明确损伤位置, 然后采用超声 C 扫描或超声红外热成像对损伤区域进行复检以确定损伤具体参数, 通过充分结合红外热成像与传统无损检测技术的优势, 在提高检测效率的同时实现损伤

的定量评估。

参考文献:

- [1] Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 201-212. (in Chinese)
- [2] Zhang Junqiang, Yan Changxiang. Application of carbon/epoxy composites to support structures of space payloads [J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(2): 79-84. (in Chinese)
- [3] Chen Yuan, Yu Fujie, Hu Mingduo, et al. Design and implementation of combination cam-type Z-pin pre-insertion device for aeronautical materials [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 379. (in Chinese)
- [4] Shah S Z H, Karuppanan S, Megat-Yusoff P S M, et al. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review [J]. *Composite Structures*, 2019, 217: 100-121.
- [5] Richardson M O W, Wisheart M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(12): 1123-1131.
- [6] Meo M, Polimeno U, Zumpano G. Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods [J]. *Applied Composite Materials*, 2008, 15(3): 115-126.
- [7] Lei L, Ferrarini G, Bortolin A, et al. Thermography is cool: defect detection using liquid nitrogen as a stimulus [J]. *NDT & E International*, 2019, 102: 137-143.
- [8] Deane S, Avdelidis N P, Castanedo C I, et al. Application of NDT thermographic imaging of aerospace structures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 456-466.
- [9] Li Yin, Tian Gan, Yang Zhengwei, et al. Detection capability evaluation of low velocity impact damage in composites using ultrasonic infrared thermography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 1124-1130. (in Chinese)

- [10] Liu Junyan, Liu Liqiang, Wang Yang. Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 138-147.
- [11] Kou Guangjie, Yang Zhengwei, Jia Yong, et al. Detection on cracks in blades with complex profile based on ultrasonic infrared thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1204002. (in Chinese)
- [12] Tian Gan, Yang Zhengwei, Zhu Jietang, et al. Vibration characteristics and acoustic chaos analysis in ultrasonic infrared thermal wave detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304003. (in Chinese)
- [13] Yang Zhengwei, Kou Guangjie, Zhou Wei, et al. Theoretical model for heat generation of crack on different preload force under ultrasound excitation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200158. (in Chinese)
- [14] Maldague X P V. Introduction to NDT by active infrared thermography [J]. *Materials Evaluation*, 2002, 60(9): 1060-1072.
- [15] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 12305-12348.
- [16] Adams R D, Cawley P, Pye C J, et al. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1978, 20(2): 93-100.
- [17] Milne A J M, Reynolds W N. The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography [C]//Proceedings of SPIE, 1985, 520(12): 119-122.
- [18] Avdelidis N P, Almond D P, Dobbinson A, et al. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2004, 40(3): 143-162.
- [19] Ibarra-Castanedo C, Avdelidis N P, Grinzato E G, et al. Delamination detection and impact damage assessment of GLARE by active thermography [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2011, 41(1-4): 5-16.
- [20] Gaudenzi P, Bernabei M, Dati E, et al. On the evaluation of impact damage on composite materials by comparing different NDI techniques [J]. *Composite Structures*, 2014, 118: 257-266.
- [21] Chulkov A O, Vavilov V P, Nesteruk D A, et al. Synthesizing data of active infrared thermography under optical and ultrasonic stimulation of products made of complex-shaped CFRP [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, 56(7): 595-601.
- [22] Li Y, Zhang W, Yang Z, et al. Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 91-102.
- [23] Pracht M, Świdorski W. Experimental testing of aramid composite applied in ballistic armour by ultrasonic IR thermography [J]. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, 2019, 10(2): 79-88.
- [24] Quattrocchi A, Freni F, Montanini R. Comparison between air-coupled ultrasonic testing and active thermography for defect identification in composite materials [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2021, 36(1): 97-112.
- [25] Panettieri E, Fanteria D, Montemurro M, et al. Low-velocity impact tests on carbon/epoxy composite laminates: a benchmark study [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 107: 9-21.
- [26] Ishikawa T, Aoki Y, Suemasu H. Pursuit of mechanical behavior in compression after impact (CAI) and open hole compression (OHC) [C]//Proceedings of 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), 2005.
- [27] Renshaw J, Chen J C, Holland S D, et al. The sources of heat generation in vibrothermography [J]. *NDT & E International*, 2011, 44: 736-739.
- [28] Upadhyay J, Jaiswal A. A joint implementation of adaptive histogram equalization and interpolation [J]. *Optik*, 2015, 126(24): 5936-5940.
- [29] Vyavahare A J, Thool R C. Segmentation using region growing algorithm based on CLAHE for medical images [C]//Fourth International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom2012), 2012: 182-185.
- [30] Shin D H, Park R H, Yang S, et al. Block-based noise estimation using adaptive Gaussian filtering [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(1): 218-226.
- [31] Dudzik S. A simple method for defect area detection using active thermography [J]. *Opto-Electronics Review*, 2009, 17(4): 338-344.