

CFRP 复合材料层板缺陷的 红外热波成像检测方法*

王 扬^{1,2}, 李 科³, 刘俊岩^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 天津航技术物理研究所, 天津 300192)

[摘要] 针对 CFRP 复合材料层板缺陷无损检测与评价的红外热波成像检测方法、热波信号处理、缺陷判定和识别及红外热波成像检测 POD 分析等进行了系统介绍, 分析了各种红外热波成像检测方法的应用与优势、适用性及局限性等, 重点介绍了红外热波成像方法应用于 CFRP 复合材料层板缺陷检测的应用实例, 并进一步阐述了复合材料缺陷红外热波成像无损检测的发展。

关键词: 复合材料; 缺陷; 红外热波成像; 无损检测

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.04.036



王 扬

教授, 博导, 省刀具技术和模具制造技术协会副理事长。主要研究领域为激光加工技术、红外无损检测技术等。近几年承担国家“863”重点、国家自然科学基金等 10 余项科研课题。主编和参编教材 4 本, 发表学术论文 150 余篇, 30 余篇被 SCI 和 EI 检索。

碳纤维复合材料是近几十年来发展迅速的一类新型材料, 碳纤维和高性能树脂基体复合而成的碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)是目前发展最成熟、应用最广泛的结构复合材料之一。CFRP 具有比强度和比模量高、热膨胀系数小、疲劳特性、化学稳定性、耐蚀性、阻尼减震效果及抗蠕变性能好等优良性能^[1]。碳纤维复合材料在航空航天、船舶、石油化工、汽车、风力发电及军事工业等领域已得到了广泛应用。在宇航工业领域, 碳纤维复合材料可用作结构材料及功能隔热材料, 如固体火箭发动机的壳体、喷管与连接部件, 卫星部件, 天线、卫星及火箭的结合部件; 在航天飞机与高超声速飞行器的机头、机翼前缘等需要进行隔热的关键区域, 常采用抗氧化碳/碳、碳/碳化硅材料制作隔热瓦或隔热盖板^[2]。在航空工业领域, 碳纤维复合材料被用来制造飞机的主翼、尾翼和机体、方向舵、起落架、副翼、发动机舱、整流罩等^[3]。碳纤维

复合材料可以减轻机身质量, 提高了燃油经济性。目前, 碳纤维复合材料在飞机上的用量和应用部位已成为飞机结构先进性的重要指标之一。

CFRP 层板与层合结构在制备过程中容易产生孔隙或气泡缺陷、贫胶或富胶缺陷、夹杂缺陷及基体开裂等缺陷^[4], 这些缺陷和损伤将严重影响碳纤维复合材料及其结构件的质量和性能, 极大地降低碳纤维复合材料构件的使用寿命。为了控制复合材料的质量, 保证其使用性能, 采用先进的无损检测方法或技术对复合材料层板缺陷进行高效、可靠、准确的检测与评价是非常必要的, 并已成为碳纤维复合材料研究和应用中的一项关键技术。由于碳纤维复合材料在制备与使用过程中存在多种类型的缺陷, 工程技术人员往往需要选用合适的无损检测技术对特定类型的缺陷进行检测, 以保证碳纤维构件的使用安全, 延长其使用寿命。在众多缺陷类型之中, 层板缺陷是最为常见且对 CFRP 层板性能影响最大

* 基金项目: 面向 CFRP 层板缺陷及铺层方向的红外热波雷达成像检测关键技术研究(51173034); 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主研究课题; 天津市科技支撑计划支持项目(13ZCZDGX00100)。

的缺陷类型之一。目前,在实际工程应用中,常规超声波检测技术、涡流检测技术及 X 射线检测技术已用于 CFRP 复合材料层板缺陷的检测^[5]。

随着先进碳纤维复合材料的发展,对无损检测技术提出了更高要求。国外从 20 世纪 70 年代以来,针对先进复合材料的研究和应用开展了全方位无损检测技术研究,出现了许多新技术和新方法,为解决碳纤维复合材料无损检测和促进复合材料推广应用发挥了重要作用,如 20 世纪 60 年代后期出现的红外热波成像检测技术、基于物理波相干原理的激光全息干涉检测技术、激光超声检测技术等。随着图像处理和计算机技术的飞速发展,又出现了多种先进检测技术联合检测的趋势,如声发射-超声检测、超声-红外热像检测、激光电子剪切散斑-红外热波成像检测等联合方法检测技术等^[6]。目前,这些检测技术已应用到碳纤维复合材料制备、结构件成型及服役过程中产生缺陷或损伤的无损检测,已从初期检测方法探索发展到检测方法研究、信号处理技术、传感器技术、缺陷识别技术、成像显示技术、定量检测与评价及寿命预测等。

红外热波成像检测技术作为一门新兴无损检测技术,已用于碳纤维复合材料的无损检测。该技术具有适用范围广、速度快、非接触、无需耦合、直观、探测面积大及使用安全等优点,特别适用于整体结构的无损检测,为碳纤维复合材料内部缺陷及性能表征的无损检测提供了新方法和新途径。本文针对 CFRP 复合材料层板缺陷的红外热波成像检测方法、原理、热波信号处理、缺陷判定及识别与 POD 分析等进行简要系统介绍,并分析各种红外热波成像检测方法的应用与优势、适用性及局限性等,并为复合材料及复合结构缺陷的红外热波成像无损检测技术研究与发展提供参考。

红外热成像检测的基本原理

1 被动式红外热像(Passive infrared thermography)

红外热成像无损检测技术是一种新兴的跨学科无损检测技术,该技术利用红外热像仪记录物体表面的温度变化,通过分析表面温度变化特征检测材料内部的缺陷。红外热成像检测技术可分为被动式与主动式两种。被动式红外热成像检测技术不需要外部热激励,主要通过测量物体与背景温度差异来确定被测物体内部是否存在缺陷及异常,常用来检测工作中的设备或电子元件。

2 主动式红外热像(Active infrared thermography) 及分类

主动式红外热成像检测技术需采用激励热源,如光激励(包括闪光灯、卤素光或激光等)、微波、超声波、电涡流、热吹风、电热毯等对被测工件进行加热,利用红外热像仪记录被测物体表面温度变化,通过对热信号特征进行提取、分析,确定材料内部的缺陷信息。

主动式红外热成像检测技术按照外部激励加载方式不同分为脉冲热成像、锁相热成像(或调制热成像)及热波雷达成像或调频热成像等;按照外部激励源的类型可分为光热成像(光热效应生热)、微波热成像(微波诱导生热)、振动或超声热成像(机械振动或超声波生热)、电涡流热成像(导电介质电磁感应生热)及磁致热成像(磁场诱导生热)等;另外也可结合激励方式与激励源类型或热信号处理方法进行分类,如脉冲相位法(PPT)、长脉冲热像(LPT)、光锁相热像(OLIT)、电涡流脉冲热像(ECPT)及超声锁相热像(ULIT)等。

热波及红外热波成像

外激励源通过调制激励材料或样件产生调制热流,在材料或样件表面形成调制温度变化,调制的温度特

征主要由介质中传热特性和热产生机制所决定。由于调制温度传递特征可利用波动物理进行解释和分析,早在 1822 年 Fourier 的数学原理分析中就指出固体热传导可将任意温度分布通过一系列波的扩展叠加而得到,同时 Fourier 和 Poisson 利用地表的每日周期性温度振荡进行估算地表岩石的热物性;Ångström 早在 1861 年即提出“温度波”的长条板热扩散率测量方法,并提出热波的概念^[7]。因此,利用热波传递可实现对材料或样件内部特性进行检测与评价。主动式红外热像检测也被称为红外热波成像检测。

1 脉冲热成像(Pulsed thermography)

脉冲热成像也可称为脉冲法红外热波成像,该检测方法是研究最多和最成熟的方法,也是使用最广泛的方法。脉冲法红外热波成像检测是采用热源对试件进行脉冲激励,瞬时高能量热流脉冲在有缺陷或损伤的构件及材料内部传导,由于试件内部的热特性不均匀而导致试件表面存在温度差异,利用红外热像仪对试件表面的温度变化进行记录,实现对构件或材料的探伤和检测。该技术与材料或构件表面发射率、环境条件及结构有关。目前,由于该方法研究较早且较深入,在损伤及缺陷的定性检测方面得到了广泛应用,但关于现场复杂条件下的缺陷检测及量化问题也一直在研究中。

脉冲法红外热波成像无损检测一般采用瞬时大功率热源对缺陷构件进行激励。热流在构件内部进行传导,从而在其内部形成稳态或瞬态不均匀的温度场。若构件中存在缺陷或不连续结构,将会导致缺陷处对应表面与其他区域出现温差,利用热成像系统采集表面温度信号的图像序列,通过后续数据处理和图像显示,确定缺陷的具体信息。

脉冲法红外热波成像检测系统

一般由 3 部分组成:(1)脉冲热激励系统;(2)热成像系统;(3)处理与分析系统,如图 1 所示。

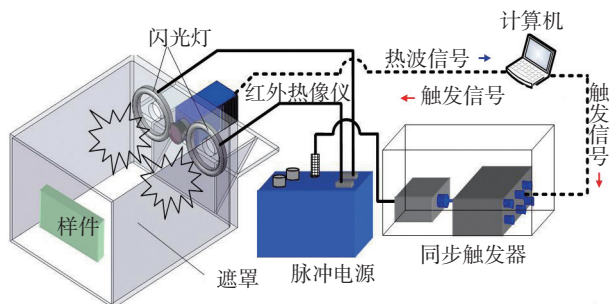


图1 光脉冲红外热波成像检测系统

Fig.1 Testing system of flash pulsed infrared thermography wave imaging

热激励系统主要包括脉冲电源、闪光灯及遮罩、同步触发器等。同步触发器保证脉冲激励与红外热像仪的记录保持同步,有利于红外图像序列的后续处理。红外热像仪采集记录软件发出的触发信号,触发信号通过同步触发器同步合成到脉冲电源,脉冲电源接收到触发信号后,其内部电容器放电,电容器放电瞬间使闪光灯发出脉冲热激励,同时红外热像仪记录被测物体表面的温度变化,并将热波信号传输给计算机,通过热波信号处理分析软件对图像序列进行热波信号特征提取与特征图像处理。

脉冲法红外热波成像检测的热波信号处理算法主要包括温度对比度法、微分法(一阶、二阶微分)、傅立叶变换 FFT (或脉冲相位法)、热波信号重构及主成分分析法(PCA)等^[8-9]。

脉冲热像法得到的热波特征图像易受表面加热不均、表面反射率及发射率不均的影响,同时瞬时高能量脉冲也易对材料表面产生热损伤。

2 锁相热成像 (Lock-in thermography)

红外锁相热波成像(LIT)检测技术是 20 世纪 90 年代发展起来的新型红外热成像无损检测技术。红外锁相热波成像检测技术是将红外热成像技术与锁相技术相结合,采用强度按正弦规律变化的外激励源对

试件或材料进行激励,在构件表面引起的温度变化也为正弦规律变化。构件表面温度以加载频率振荡变化,

其幅值和相位与材料的性质有关,当构件内部存在缺陷时,则有缺陷处与无缺陷处在构件表面引起的温度变化将产生幅值和相位的差异,从而可以确定缺陷的特征。由于相位信息比幅值信息更丰富,能够进一步改善信噪比,与材料的表面辐射发射率、环境条件及构件结构等无关,可获得更多的缺陷信息。

一个典型的红外锁相热波成像检测系统包括:(1)调制热激励系统;(2)红外热像仪;(3)红外图像采集、处理和分析系统,如图 2 所示。

红外锁相热波成像检测系统工作过程为:信号发生器产生按正弦或方波规律变化的激励信号,通过功率放大器驱动卤素光源对被测物体加热,同时将信号发生器产生的调制

激励信号作为参考信号输入数字锁相器或计算机进行采集,并与红外热像仪采集的红外图像序列进行锁相运算处理,提取物体表面周期热波信号的幅值和相位信息,并将结果以图像的形式进行显示,从而能在分析处理系统中可进行图像对比度增强等处理。

红外锁相热波成像的热波信号处理算法主要包括 4 点平均算法、傅立叶变换算法、双路数字锁相相关处理算法及瞬态时间常数算法等^[10-11]。

红外锁相热波成像相位信息可以有效地减少加热不均对检测结果的影响,但是红外锁相热波成像的检测缺陷深度与调制频率密切相关。由于单一调制频率热波只能探测其相应扩散深度的缺陷,因此对材料内部不同深度或不同铺层界面的缺陷,需要选择不同调制频率对材料进行激励,避免出现“盲频”现象。另外,该方法检测时间较长,且容易出现漏检,很难保障检测材料内部不同深度的可检尺度范围缺陷。

3 热波雷达成像 (Thermal-wave radar imaging)

加拿大多伦多大学先进扩散波技术研究中心 Tabatabael 教授^[12-13]将线性调频雷达探测技术引入到红外热波成像检测技术中。二者结合后具有红外热像检测与连续线性调频雷达探测技术的双重优点,可显著

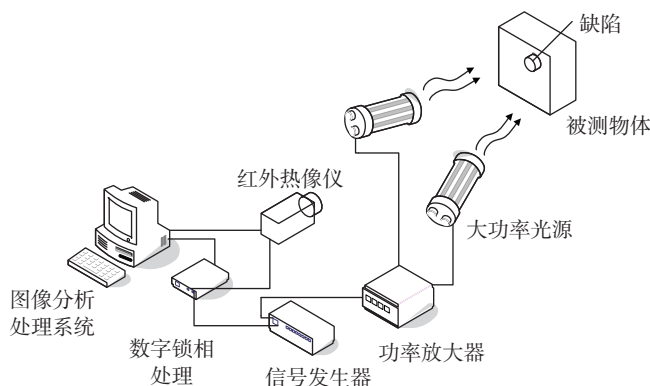


图2 光激励红外锁相热波成像检测系统示意图

Fig.2 Diagram of optical lock-in thermography wave imaging testing system

提高检测效率与检测灵敏度,实现不同深度缺陷的一次性可靠检测。

红外热波雷达成像检测技术采用 Chirp 调制信号对激励热源(如卤素光、激光、超声波及电涡流等)进行连续调制,对检测试样进行主动加热,并采用红外探测器(红外相机或红外热像仪)采集记录试样表面温度变化,通过对表面温度振荡信号(热波雷达信号)进行特征提取得到特征图像,进而实现材料内部缺陷及特性的检测。

采用函数发生器产生的线性调频信号(Chirp 信号)控制光源的功率放大器,使光源光强按照 Chirp 信号规律变化,在材料表面产生线性调频面热流;数字锁相放大器和延时发生器分别同步和延时记录函数发生器产生的 Chirp 信号;红外热像仪连续获取热图像序列,并通过计算机处理,分别进行同步锁相运算实现表面热波雷达信号的频域多频率扫描分析和进行延时相关运算实现表面热波雷达信号的时域相关分析,以获得表面热波雷达信号的时频域特征信息,即可实现缺陷的判定与检测。

热波雷达信号处理算法主要包括相关算法、Hilbert 变换瞬时特性时域积分算法及双路 Chirp 锁相相关算法等^[14]。为了提高热波雷达信

号特征信息的提取效率,采用多项式拟合方法去除静态热流分量引起的热累计相干项,并结合快速傅里叶变换算法的优势,在频域内进行热波雷达信号处理,图 3 为特征信息提取算法的运算流程图^[14]。

4 超声红外热波成像 (Ultrasound infrared thermal-wave imaging)

超声红外热波成像检测技术是将超声振动激励加载与红外热成像检测技术相结合的一种红外热波成像检测技术。

采用超声红外锁相热波成像检测时,将由激励头发出的调幅超声波有效地注入构件,构件缺陷处由于机械能损耗效应或摩擦作用注入的超声波衰减产生热量,通过热传导使构件表面形成变化的温度场;红外热像仪对表面温度场进行记录并得到热图序列,通过提取表面温度变化的幅值与相位特征信息,得到幅值图和相位图,利用缺陷和无缺陷区域幅值和相位的差异来判定缺陷。超声频振动激励在构件缺陷处选择性加热,可显著提高检测缺陷对比度。超声波激励效率、超声波在构件内的传播及在缺陷处的衰减、红外热像仪性能及热波信号的特征提取算法都是影响获得准确检测结果的关键因素。

5 电涡流红外热波成像 (Eddy

current thermal-wave imaging)

电涡流红外热波成像检测技术是将电涡流探测与红外热成像检测相结合的一种红外热波成像检测技术^[13]。

采用电涡流红外锁相热波成像检测时,涡流线圈作用于导电介质材料,由于电磁感应和焦耳热效应产生热量,通过热传导使样件表面形成变化的温度场;采用红外热像仪对表面温度进行记录并得到热图序列,通过提取表面温度变化得到幅值图和相位图,利用缺陷与无缺陷区域幅值和相位的差异来判定缺陷。

CFRP 层板缺陷的红外热波成像检测

采用平底孔模拟 CFRP 层板的脱粘缺陷,并利用红外热波成像对 CFRP 模拟缺陷进行检测试验。图 4 给出了缺陷深度(缺陷到表面距离) $<1\text{mm}$,缺陷直径为 $\phi 10\text{mm}$ 的脉冲光激励红外热波成像检测结果。

由图 4 可看出,直接采用红外热图(见图 4(a)所示)进行缺陷检测时,由于 CFRP 材料表面反射率及加热不均的影响,较深的缺陷难于进行可靠检测,而通过傅立叶变换和 PCA 处理(如图 4(b)和图 4(c)所示)能够有效消除这些影响,显著提高缺陷探测能力。

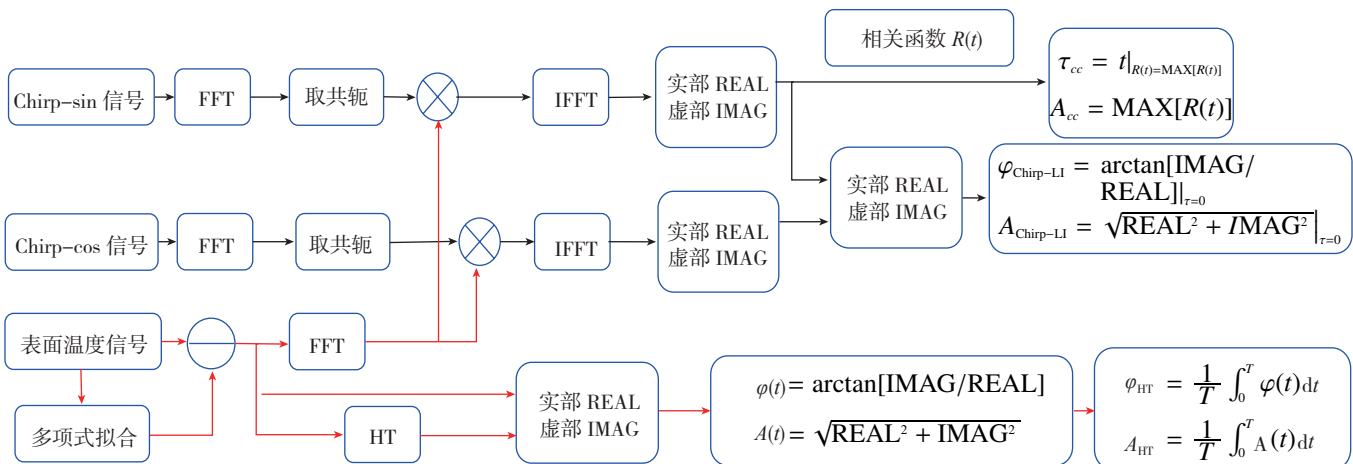
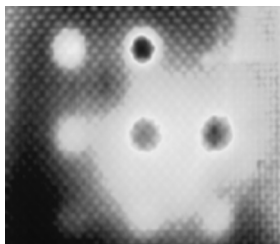
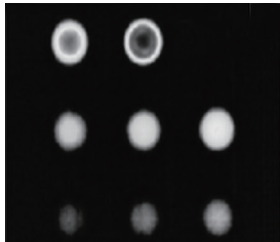


图3 特征信息提取算法运算流程图

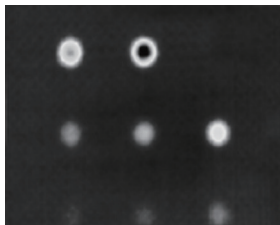
Fig.3 Flowchart of characteristic information extraction algorithms



(a) 最大温度对比度



(b) PPT 相位



(c) PCA 法

图4 脉冲红外热波成像检测结果

Fig.4 Detection results of pulsed infrared thermography

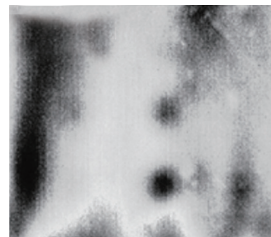
采用红外锁相热波成像与热波雷达成像对 CFRP 层板样件进行检测,结果如图 5 所示。由图 5 (a)可知,采用红外锁相热波成像检测时,调制频率 $f=0.04\text{Hz}$,深度超过 3.0mm 的缺陷不能探测到;而调制频率减小为 $f=0.02\text{Hz}$,如图 5 (b)所示,深度超过 3.0mm 的缺陷能够检测到,但对比度和信噪比相对较低。这也表明,采用红外锁相热波成像检测时,需要选择不同的调制频率实现不同深度损伤或缺陷的可靠检测。由图 5 (c)可看出,初始频率 $f_0=0.02\text{Hz}$,终止频率 $f_1=0.04\text{Hz}$,采用红外热波雷达成像检测能够实现不同深度缺陷一次性可靠检测,相比红外锁相热波检测具有较高对比度和信噪比。因此,采用红外热波雷达成像检测方法可实现 CFRP 层板深度为 3.0mm、直径为 $\phi 10\text{mm}$ 的缺陷的可靠检测。

图 6 为采用超声波与卤素扩展

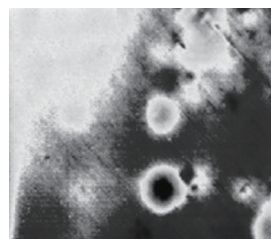
光激励红外锁相热波成像检测 C/C 复合材料内部裂纹的结果^[4]。可知,采用超声波激励的红外锁相热波成像检测方法可实现 C/C 复合材料内部裂纹的可靠检测,而扩展光激励则难于检测到内部裂纹。由于超声波激励在内部裂纹处摩擦生热,具有选择加热特性,而使得超声红外热波成像对裂纹等界面缺陷具有较高敏感性。超声红外热波成像检测可弥补光激励红外热波成像检测的不足。

德国斯图加特大学 Riegert 教授等^[15]研究了采用电涡流与超声激励的红外锁相热波成像检测 CFRP 层板冲击缺陷。

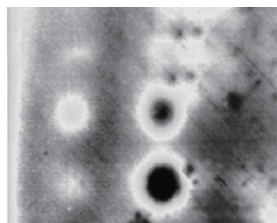
通过对比 ILIT 和 ULIT 的相位图像,可清晰检测到 CFRP 层板冲击损伤,如图 7^[6]所示。但二者分辨率不同,这是由于超声与电涡流激励的生热机理不同,ULIT 对于内部较深且面积较大的界面缺陷(脱粘)较敏



(a) 锁相法检测, $f=0.04\text{Hz}$



(b) 锁相法检测, $f=0.02\text{Hz}$



(c) 热波雷达检测, $f_0=0.02\text{Hz}, f_1=0.04\text{Hz}$

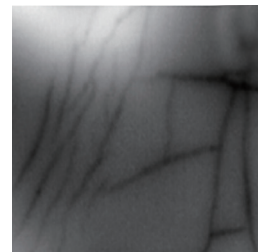
图5 红外锁相热波成像及热波雷达成像检测结果

Fig.5 Detection results of LIT and TWRI

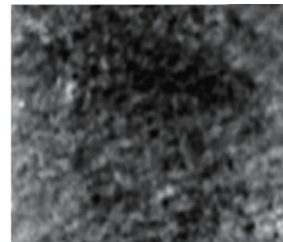
感,而电涡流主要在材料表面浅层生热,由于冲击损伤导致的纤维断裂改变了其电特性,使 ILT 对纤维断裂相比内部的 CFRP 层板脱粘更为敏感。

缺陷判定、尺寸识别及 POD 分析

针对红外热波成像检测的缺陷



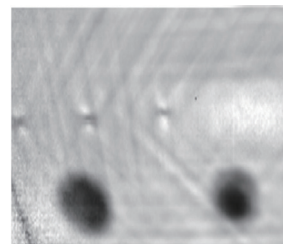
(a) 超声红外锁相热波成像(ULIT)



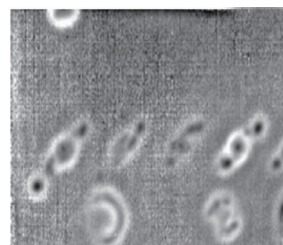
(b) 扩展红外锁相热波成像(OLIT)

图6 超声波与扩展光激励的红外锁相热波成像检测结果

Fig.6 Detection results of ultrasound and optical lock-in thermography



(a) 电涡流红外锁相热波成像(ILIT)



(b) 超声红外锁相热波成像(ULIT)

图7 电涡流与超声激励的红外锁相热波成像检测结果

Fig.7 Detection results of ILIT and ULIT

判定,提出了基于热波图像信噪比的缺陷判定准则。当热波特征图像疑似缺陷处与其周围特征对比度超过周围特征标准差 2 倍以上,可认为该处为缺陷的置信概率达到 95%,即热波特征图像疑似缺陷处信噪比超过 2,则判定为缺陷^[17]。

采用红外锁相热波相位特征图像进行缺陷判定,可得相位对比度 $|\Delta Ph|$ 与信噪比 SNR :

$$|\Delta Ph| = \left| \overline{Ph_{S_1}} - \overline{Ph_{S_2-S_3}} \right| (S_1 \in S_2 \in S_3), \quad (1)$$

$$SNR = \frac{\left| \overline{Ph_{S_1}} - \overline{Ph_{S_2-S_3}} \right|}{\sigma_h} (S_1 \in S_2 \in S_3), \quad (2)$$

其中,

$$\overline{Ph_{S_1}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{S_1}} \sum_{j=1}^{N_{S_1}} Ph_{S_1}(i, j)}{N_{S_1}^2}, \quad (3)$$

$$\overline{Ph_{S_2-S_3}} = \frac{\sum_{i \neq m} \sum_{j \neq n} [Ph_{S_2}(i, j) - Ph_{S_3}(m, n)]}{(N_{S_3} - N_{S_2})^2} (S_2 \in S_3), \quad (4)$$

$$\sigma_m^{S_1-S_2} = \text{std} [Ph(x, y)|_{x,y \in S_1-S_2}] (S_2 \in S_3), \quad (5)$$

式中, $\overline{Ph_{S_1}}$ 、 $\overline{Ph_{S_2-S_3}}$ 为缺陷处与周围的 LIT 相位均值; $Ph_{S_1}(i, j)$ ($k=1, 2, 3$) 为选择区域的相位; $\sigma_m^{S_1-S_2}$ 为周围区域的标准差。

通过对表面热波信号特征进行分析可知,对表面热波信号特征空间分布进行微分处理,可利用一阶微分(或二阶微分)处理得到的单个零值(或单个极值)与双极值(或双零值)点确定损伤中心位置及边界。

首先,对特征空间分布进行归一化处理,在此基础上采用热传导偏微分方程方法进行滤波处理,之后对特征分布进行微分处理,对于一阶空间微分(或二阶微分)的极值(或零值)位置的差为缺陷尺寸。

$$C''_T(x, y) = C'_T(x+i, y) - C'_T(x+i-1, y), \quad (6)$$

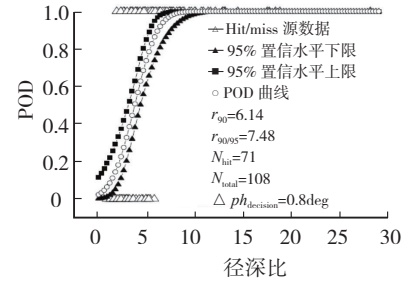
$C''_T(x, y) = C'_T(x+i, y) - C'_T(x+i-1, y)$, (7) 式中, $C'_T(x, y)$ 为热波信号特征空间分布; $C'_T(x, y)$ 为热波信号特征空间一阶微分; $C''_T(x, y)$ 为热波信号特征空间二阶微分。

采用特征空间分布微分处理确定的缺陷位置相对于参考标准原点为 (14.6mm, 43.8mm), 其尺寸为 4.2mm, 与实际尺寸相差 0.2mm, 偏差约为 5%, 表明采用该方法能够相对准确得到损伤或缺陷尺寸。

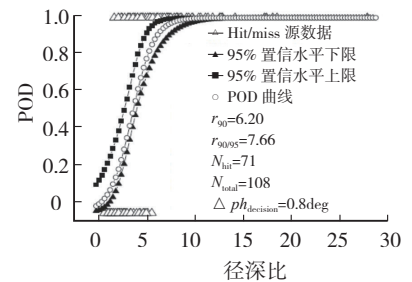
针对给定的无损检测系统或方法,一般采用 POD (Probability of Detection) 分析技术评价该系统或方法的无损检测可靠性。POD 定义为在给定检测系统、方法与工艺下,某一尺寸缺陷能够被检测出的概率。由于检测过程中存在随机性与不确定性,检测信号是不确定的,一般认为其概率密度分布服从正态分布。

POD 分析的目标是建立缺陷尺寸与缺陷可探测概率之间的关系曲线,因此,在进行 POD 相关计算时,应首先对无损检测原始数据做相应的预处理,建立缺陷尺寸与检测数据之间的响应关系,进而利用响应数据拟合缺陷概率密度分布模型参数,最终获得缺陷的 POD 曲线。图 8 给出了采用红外锁相热波成像检测 CFRP 层板缺陷并基于 Hit/Miss 数据处理得到的 POD 曲线^[17]。可以看出,不同连接函数的 POD 曲线相近,表明在给定缺陷尺寸及深度范围,采用红外锁相热波成像检测缺陷尺寸特征的径深比 $r_{90/95}$ 达到 7.48 和 7.66 的置信概率为 95%,实现了对给定 CFRP 层板的红外锁相热波成像检测能力评价。

结合 C/C 复合材料板材平底孔模拟缺陷样件的红外锁相热波层析成像结果^[18]可以看出,采用红外热波层析成像技术可实现材料或结构内部缺陷的三维可视化检测,从而为红外热波成像可靠检测缺陷提供了重要手段。



(a) Log-normal POD 曲线



(b) Log-odds POD 曲线

图8 POD曲线

Fig.8 POD curves

结束语

本文针对 CFRP 层板缺陷的红外热波成像检测方法的原理、系统组成、热波信号处理方法等方面进行了系统论述。主要对脉冲红外热波成像、红外锁相热波成像、红外热波雷达成像、超声红外锁相热波成像及电涡流红外锁相热波成像等方法检测 CFRP 及 C/C 复合材料缺陷及损伤的应用进行了讨论,给出了缺陷判定准则、缺陷位置及尺寸识别等方法,同时也通过 POD 分析实现了 CFRP 层板缺陷的红外锁相热波成像检测能力的评价。综上分析与讨论,红外热波成像检测方法可用于 CFRP 层板缺陷的检测,并具有非接触、直观、大面积及可靠检测等优势,可成为超声波检测、X 射线检测及电涡流检测等常规检测方法的有力补充。随着先进复合材料及复合结构的发展及其在航空航天领域、汽车、船舶、高铁列车及化工等工业领域的广泛应用,红外热波成像检测方法在复合材料制备、质量控制及使用性能与寿命等分析与评价方面将发挥重要作用。特别是红外热波成像检测的定量化、

工程化研究将成为该技术主要研究热点,同时如何进一步提高检测结果的信噪比及定量化精度成为该检测手段的研究难点。

参考文献

[1] 张晓虎,孟宇,张炜.碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J].纤维复合材料,2004,1:50-53.
ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced polymer [J]. Fiber Composite, 2004(1): 50-53.
[2] 杨乃斌,梁伟.大型民机机体结构用复合材料分析[J].航空制造技术,2009(5):68-70.
YANG Naibin, LIANG Wei. Analysis on composite material used on airframe structure of large civil aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(5): 68-70.
[3] 罗益锋.碳纤维复合材料新动向[J].高科技纤维与应用,2009,34(3):1-6.
LUO Yifeng. The new trend of carbon fiber reinforced materials [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009, 34(3): 1-6.
[4] 顾铁卓,张佐光,李敏,等.复合材料变厚层板热压成型缺陷类型与成因实验研究[J].复合材料学报,2008,25(12):41-46.
GU Yizhuo, ZHANG Zuoguang, LI Min, et al. Experimental study on type and cause of defects in variable thickness composite laminates during hot pressing process [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(12): 41-46.
[5] 张博明,叶金蕊,周正干,等.增韧

树脂基碳纤维复合材料结构无损检测技术研究[J].航空制造技术,2010(17):78-81.
ZHANG Bomng, YE Jinrui, ZHOU Zhenggan, et al. Nondestructive testing technology for toughened carbon fiber reinforced resin composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010 (17): 78-81.
[6] 葛邦,杨涛,高殿斌,等.复合材料无损检测技术研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2009(6):67-71.
GE Bang, YANG Tao, GAO Dianming, et al. Advanced nondestructive testing of composite materials [J]. FRP/CM, 2009(6): 67-71.
[7] ALMOND D P, PATEL P M. Photothermal science and technology [M]. London: Chapman & Hall, 1996.
[8] TANG Q J, LIU J Y, WANG Y. Experimental study of inspection on SiC coated high-temperature alloy plates with defects using pulsed thermographic technique [J]. Infrared Physics & Technology, 2013,57(3):21-27.
[9] TANG Q J, LIU J Y, WANG Y, et al. Inspection on SiC coated carbon-carbon composite with subsurface defects using pulsed thermography [J]. Infrared Physics & Technology, 2013,60:183-189.
[10] BUSSE G, WU D, KARPEN W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71: 3962-3965.
[11] LIU J Y, WANG Y, DAI J M. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT [J]. Infrared Physics and Technology, 2010, 53:348-357.

[12] TABATABAEI N, MANDELIS A, AMAECH B T, et al. Thermophotonic radar imaging: an emissivity-normalized modality with advantages over phase lock-in thermography [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(16):3706.
[13] TABATABAEI N, MANDELIS A. Thermal coherence tomography using match filter binary phase coded diffusion waves [J]. Physics Review Letters, 2011, 107(16):5901.
[14] GONG J L, LIU J Y, QIN L, et al. Investigation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet with subsurface defects inspection using thermal-wave radar imaging (TWRI) based on the multi-transform technique [J]. NDT&E Int., 2014, 62: 130-136.
[15] RIEGERT G, ZWESCHPER T, BUSSE. Lock-in thermography with eddy current excitation [J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2004, 1(1):121-132.
[16] LIU J Y, LIU L Q, WANG Y. Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites [J]. Composites: Part B, 2013, 45: 138-147.
[17] LIU J Y, LIU Y, WANG F, et al. Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials [J]. Infrared Physics and Technology, 2015, 71: 448-456.
[18] LIU J Y, GONG J L, QIN L, et al. Three-dimensional visualization of subsurface defect using lock-in thermography [J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36:1226-1235.

Nondestructive Testing and Evaluation (NDT&E) for CFRP Laminate With Subsurface Defects Using Infrared Thermal Wave Imaging

WANG Yang^{1,2}, LI Ke³, LIU Junyan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics and System (HIT), Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

[ABSTRACT] This paper summarizes the nondestructive testing and evaluation (NDT&E) for CFRP laminate with subsurface defects using an infrared thermal wave imaging (TWI) including the principles and approaches, thermal wave signal processing algorithms, defect determination and detection, probability of detection (POD) of defect using TWI and defect size and depth identification. The application and advantages of TWI for NDT&E of composites are expressed, and the applicability and limitation of TWI are deeply discussed. Additionally, special emphasis is focused on the practical application of TWI on the CFRP laminate with subsurface defects, and some trends in the further development of TWI for CFRP laminate NDT&E are described.

Keywords: Composites; Defect; Infrared thermal wave imaging; Nondestructive testing

(责编 谷雨)