

## 基于移相技术的含缺陷复合材料锁相热波检测

王震<sup>1</sup>, 杨正伟<sup>1,2</sup>, 陶胜杰<sup>1</sup>, 朱海波<sup>1</sup>, 张炜<sup>1</sup>

- (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)

**摘要:** 为提高锁相热波检测技术的缺陷识别能力和准确度, 提出了基于移相技术的温度序列处理方法。建立厚度渐变的碳纤维复合材料阶梯板模型, 研究不同调制周期下厚度与相位的关系, 通过数值计算对比分析了不同调制周期温度序列不移相与移相对相位的影响, 结果表明: 移相 180° 后, 相位对厚度的灵敏度提高了三倍, 不同厚度之间的相位差明显变大, 增强了对缺陷的识别能力。采用含平底洞缺陷的碳纤维板进行了实验验证, 比较了不移相和移相 180° 得到的相位图, 结果表明: 移相后可以识别出更小的缺陷, 而且缺陷附近的对比度得到了显著提高, 验证了移相技术对提高锁相热波检出能力的有效性。

**关键词:** 锁相热成像; 热波检测; 移相技术; 相位图; 碳纤维复合材料

**中图分类号:** TN722 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S204002

## Lock-in thermal wave detection of defective composite material based on phase-shifting technology

Wang Zhen<sup>1</sup>, Yang Zhengwei<sup>1,2</sup>, Tao Shengjie<sup>1</sup>, Zhu Haibo<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to improve the defect recognition ability and accuracy of the lock-in thermal wave detection technology, a temperature sequence processing method based on phase-shifting technology was proposed. A step-plate model of carbon fiber composite material with gradual thickness was established to study the relationship between thickness and phase under different modulation periods, effects of non-phase-shifting and phase-shift of temperature series in different modulation periods were numerically analyzed, the results show that the sensitivity of the phase to thickness is increased by three times after phase-shifting by 180°, and the phase difference between different thicknesses is increased, which enhances the ability to identify defects. The carbon fiber plate with flat hole defects was used to verify the numerical calculation and the phase diagram obtained by non-phase-shifting and phase-shifting by 180° was compared, the results show that smaller defects can be identified after phase-shifting and the

收稿日期: 2019-04-10; 修订日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51575516, 51605481); 中国博士后基金(2019M650262); 航空基金(201803U8003)

作者简介: 王震(1996-), 男, 博士生, 主要从事飞行器推进系统检测与故障诊断方面的研究。Email: wangzhen6822@163.com

导师简介: 杨正伟(1982-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器推进系统检测与故障诊断方面的研究。

Email: yangzhengwei1136@163.com

contrast near the defect was enhanced, which proved the effectiveness of phase-shifting technology to improve the ability of lock-in thermal wave for detecting defects.

**Key words:** lock-in thermography; thermal wave detection; phase-shifting technology; phase diagram; carbon fiber composite material

## 0 引言

随着航空航天技术的迅猛发展,材料的结构完整性和可靠性对飞行器的性能和安全性越来越重要。由于材料在生产过程中容易受到各种工艺、人为及环境因素的干扰,材料的内部或者不同材料的接触面易出现夹杂、孔隙、脱粘、强度弱化等缺陷<sup>[1-3]</sup>,此外在运输、贮存及使用过程中的各种动静载荷、机械损伤、高温、高压、蠕变等因素也会引起各种损伤的产生、缺陷的扩展及材料的老化<sup>[4]</sup>,可能造成航天器主要结构的性能急剧下降。如果不能及时发现这些缺陷或损伤,可能酿成灾难性的后果。因此,采用可靠的无损检测手段及时检测材料结构的缺陷和损伤,将大大提高整个飞行器系统的安全性和可靠性。

锁相热成像技术作为一种新兴的无损检测技术,利用调制热激励驱动器驱动石英灯或卤素灯周期性地对物件表面进行加热,热像仪实时记录表面温度,通过后续处理计算出温度相位,根据相位的不同来判定缺陷的参数<sup>[5-6]</sup>,具有检测速度快、观测面积大、检测结果直观、非接触等优势,在国内外得到了广泛的发展和运用。

G. Busse<sup>[7]</sup>提出并发展了光调制红外锁相热像无损检测法。T. Sakagami 等<sup>[8]</sup>对光锁相法进行了实验研究,结果表明:光锁相热像法适合检测平底孔类缺陷,并对混凝土结构分层缺陷利用光锁相法进行了定量检测,通过对比相位变化有效确定了缺陷大小和位置,并由相位滞后与加热周期间的关系确定了缺陷深度。M. Ishikawa<sup>[9]</sup>利用脉冲相位法对有机玻璃平底洞试件进行了实验,检测到了 5~6 mm 深度的缺陷,相比之前报道的 3.5 mm 有很大的提高。穆玉伟<sup>[10]</sup>基于 ANSYS 对锁相红外无损检测进行了数值模拟及分析,指出在同种均匀介质中,物体表面热图相位随材料厚度的增加而增加,因此,相位差也是随深度增加而增大。汪子君<sup>[11]</sup>利用相关算法提取相位,对碳纤维蒙皮蜂窝夹层结构的缺陷试件和

Q235 钢平底洞试件进行了研究,结果表明:激励频率的变化对试件表面热波温度差和相位差的影响明显,通过相位差判定缺陷具有明显优势。以上均对材料的厚度差异类、分层类缺陷进行了多种锁相检测技术的研究试验,但大部分是通过分析相位的差异来判断缺陷的有无和位置,对相位与材料厚度或者缺陷深度的关系研究甚少,而且对于同一个温度序列,数据处理过程不同,计算出的相位也不同,对此仍需进一步地研究和探索。

作为锁相热成像技术的核心,温度序列的处理方法和相位计算方法直接影响最终的相位计算结果,从而决定缺陷的识别能力和准确度。目前的锁相检测中,通常直接用快速傅里叶变换对原始的温度序列计算相位,可以检测浅层的大缺陷,但对于较深的小缺陷,检测和识别能力有限<sup>[12]</sup>。鉴于此,文中提出基于移相技术的原始温度序列处理方法,以提高相位对缺陷深度和大小的灵敏度,增大缺陷区域与正常区域的相位差异,增强红外热图对比度,从而提高缺陷的识别能力。

## 1 移相的含义和作用

锁相热成像检测技术利用按照一定功率函数变化的热流来加热待检测的材料表面,热量向物体内部传导的过程中如果遇到缺陷,对应缺陷处的表面温度序列相位会发生改变。利用红外热像仪记录物体表面的温度序列并分析规律差异,采用相位提取算法,从相位的分布特征可判别缺陷的位置、类型和参数。常用的热功率函数表达式为:

$$p=A_m \frac{1-\cos(2\pi ft)}{2} \quad (1)$$

式中: $p$  为加热功率; $A_m$  为功率幅值; $f$  为调制频率。

在正弦调制锁相检测中,在材料表面施加一个确定频率的热流激励后,其表面温度变化如图 1 所示,温度在上升的同时,伴随着与热流频率相同的正弦温度波动。不同深度缺陷处的温升速度和波动幅度有差异,更重要的是正弦波动的峰值时间也即相

位有差异。为了保证相位的计算速度,采用基于采样长度连续可变的相位计算式<sup>[13]</sup>,如公式(2)所示。热源只有一个频率成分,所以只需要计算一个频率信号的相位,不需要计算各次谐波。快速傅里叶变换只是计算相位的一种方法,并非唯一,公式(2)同样可以计算出需要的频率相位,且不计算谐波,实验的结果也不需要谐波信息,这一点不同于快速傅里叶变换。

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} T(n) \cos(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} T(n) \sin(2\pi n/N)} \right) \quad (2)$$

式中:  $T(n)$  为红外热图中某点的温度序列;序列长度为  $N$ ;  $\varphi$  为以  $N$  长度序列为周期信号的相位。

利用公式(2)对图 1 中的一个完整周期的温度序列进行处理,计算出相位。当材料的厚度或者内部的缺陷深度发生改变时,所计算的相位值也会发生变化,变化越明显,越有利于判定缺陷深度或者材料厚度,即相位随深度和厚度的变化灵敏度应达到一定的要求。然而在锁相检测中,对于较小、较深的缺陷,往往由于相位的灵敏度太小而导致相位图的对比度太低,很难识别出缺陷的位置和深度,因此须采用有效的数据处理方法提高相位灵敏度。

移相是一个广泛的概念,既可以用于检测之前生成参考信号,也可以用于后续数据处理。由于调制热源的热场的特性(加热功率的起始连续性和热源对试件的近似单向热传递),对参考信号即热源进行相位调制灵活性太差,具有很大的局限性,故采用对后续数据序列的处理方法,选取不同时间段的数据。对于图 1 中的温度序列,通常在计算相位时选取的起始点时刻为 0,如果温度序列的起始点不在 0 时刻,也就是温度序列相对于 0 时刻发生了“移相”,如图 1 所示,

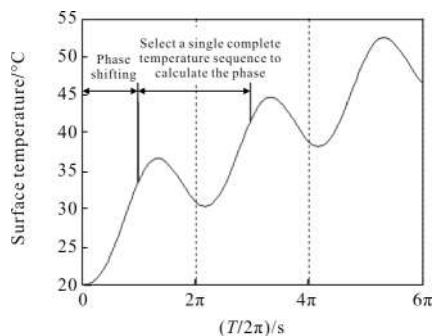


图 1 移相定义示意图

Fig.1 Schematic diagram of phase-shifting definition

那么利用公式 (2) 计算出来的相位灵敏度也会发生变化,如果移相值取 0~360°范围内的某一个值时相位的灵敏度得到了显著提高,那么就可以利用该方法预先处理温度序列,从而改善相位图的对比度。基于此,提出了基于移相技术的热图序列处理方法以增强锁相热波对缺陷的识别能力。

## 2 数值计算

由于公式(2)是一个非线性方程,而且当材料中的缺陷尺寸发生变化时,对应温度序列的相位也会发生变化,所以温度序列的移相值与计算出来的相位值呈非线性关系,难以直接推导相位与移相值关系表达式,因此,采用数值计算方法分析不同的移相值对相位灵敏度的影响。

### 2.1 模型的建立与简化

建立一个厚度从 1~20 mm 变化的碳纤维复合材料阶梯平板状试件,每隔 1 mm 设置一个厚度,不同厚度的各个区域之间互相分离,以避免温度沿平面方向传播,减少热导率差异对相位的影响,这主要考虑到复合材料是各向异性材料,沿纤维方向、并行纤维之间以及铺层之间的热导率都可能存在数倍的差异。

由于试件是从表面垂直加热,热量只沿厚度方向传播,在平面方向上不存在温度梯度,所以平面方向只划分一个网格即可,厚度方向上的网格密度是 0.1 mm,试件模型及网格划分如图 2 所示。

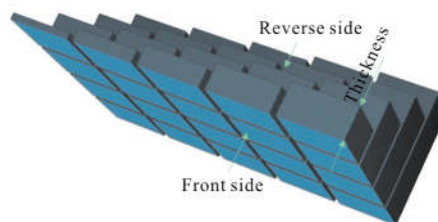


图 2 简化模型及网格划分

Fig.2 Simplified model and meshing

材料相关的物性参数如下:

热导率  $\lambda=1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、比热容  $c=700 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 和密度  $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$ ;表面热对流系数为  $4 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。计算过程中,环境温度和初始温度设为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,正弦调制激励下材料表面吸收的热功率为:

$$p = P_{\max} \frac{1 - \cos \omega t}{2} \quad (3)$$

式中： $P_{\max}$  为加热器最大输出功率； $\omega$  为调制角频率。

在正面施加按上式变化的热功率， $P_{\max} = 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ ，调制周期依次设置为 10、20、60、100、200、300、400 s，整个过程只有一个分析步，计算 4 000 步，总时间为 4 个完整的调制周期。每种调制周期下得到一个计算结果，选取各个厚度的完整温度序列，从不同开始时刻的一个整周期温度序列中计算相位。

### 2.2 不同周期序数下厚度与相位的关系

在实际的未知缺陷深度检测中，往往是通过温度序列采集和相位计算获得各个位置的相位，那么就需要通过相位-厚度的关系来换算出缺陷深度。为获取一定厚度范围内的相位-厚度关系，尝试多种不同调制周期的热激励，下面通过仿真计算的方法来分析调制周期与厚度的关系。

图 3 为 7 种调制周期下相位随厚度的变化关系。每种调制周期采集 4 个完整周期的序列，分别用颜色相同的曲线表示第 1、2、3、4 个周期的相位。可以看出：在 10、20、60 s 较短调制周期的激励下，相位随厚度的增加而增加，而后增加速度逐渐变缓，直至接近水平，对于较长的 100、200、300、400 s 周期的激励，相位随着厚度的增大先减小到一个谷值，而后逐渐增加，增加速度逐渐变慢。图中 7 个不同调制周期的厚度-相位关系曲线上，显然选取各个调制周期下相位随厚度单调、近似线性上升的区间来建立厚度-相位的关系比较合适。7 个调制周期分别在 1~3、1~5、1~7、2~9、3~12、4~15、5~19 mm 范围内有较好的线性和厚度-相位灵敏度，调制周期越大，所能检测的厚度范围也越大。

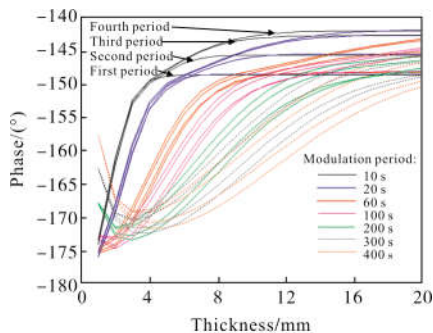


图 3 不同调制周期下相位与厚度之间的关系  
Fig.3 Relationship between phase and thickness under different modulation periods

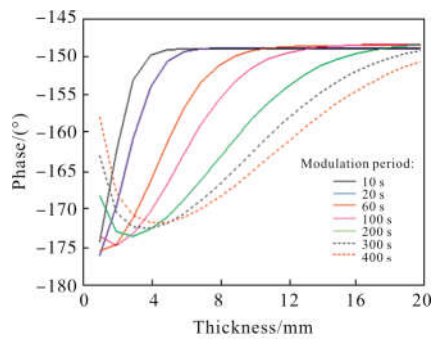
图中调制周期较长的相位曲线出现了谷值，且谷值对应的厚度也是随着调制周期的增加而增加。在谷值左侧，厚度-相位关系曲线也存在着单调、近线性区间，但是该区域对应的厚度范围太小，不适合建立厚度-相位的变换关系，可视为该调制周期下的检测死区。而要实现对此深度范围缺陷的检测，则需减小调制周期，使其相位落在曲线的近线性上升段。图中调制周期较短的相位曲线没有出现谷值，根据检测死区随调制周期缩短而减小的规律，可推断出其死区范围在 1 mm 以内，图中的起始厚度是 1 mm，所以无法显示其相位谷值。由此可知，虽然长的调制周期能检测更宽的厚度范围，但与短调制周期的窄检测厚度范围相比并不是包含关系，而是重叠和衔接关系。在对未知深度范围的缺陷检测过程中，只通过单一的调制周期激励可能无法检测到正确的深度，为实现检测范围的有效衔接，增加检测的准确性，须采用两个或者多个不同调制周期的热激励。

对于调制周期较长的热激励，若未知哪个周期的温度序列计算出的相位更准确，则需采集多个完整的周期作比较，耗时可能会达到十几分钟甚至更长时间，这在应用中是不现实的。因此，对各个调制周期下，不同完整周期对相位计算结果的影响进行研究。在模型中，每种调制周期下计算了 4 个完整调制周期的温度变化数值，发现各个周期内温度变化的主要区别在于第一个周期由于调制信号中恒定分量的加载，使其温度呈指数规律快速上升，而后续几个周期中的恒定温度分量逐渐平缓，温度上升速率也逐渐减缓。图 3 中分别用相同颜色的曲线显示了不同调制周期下 4 个完整周期的相位。从图中可以看出：各个周期序数下相位曲线的斜率、可检测厚度范围、死区范围无明显变化，周期序数越大，相位曲线越靠上，但检测效果基本相同。因此，在实际检测中只需采集第一个完整周期的温度序列即可，无需采集更多周期数的温度序列，从而保证了锁相热成像技术的检测效率。

### 2.3 移相对相位曲线的影响

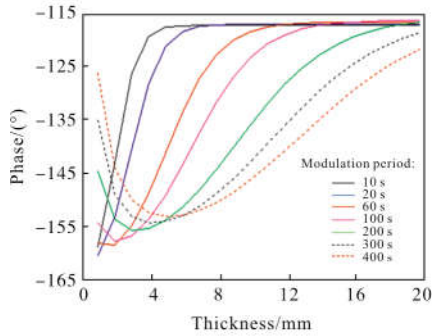
长的调制周期，在增加了更厚更深的缺陷检测能力的同时，也增加了厚度的死区范围，损失了薄的浅的缺陷检测能力，而且减小了厚度/相位的系数，

降低了厚度分辨能力。调制周期短,相位曲线死区范围小在图中难以显现,对小缺陷检出困难。由此引发了对于这类较深、较小的缺陷,往往由于相位灵敏度太小而导致相位图的对比度太低,很难识别缺陷的位置和深度,为此提出基于移相技术的温度序列处理方法提高相位灵敏度。图 4 分别显示了移相  $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $225^\circ$  时不同调制周期下相位随厚度的变化规律以及不同的移相值对相位的影响,同时也显示了不移相(移相  $0^\circ$ )时的变化规律便于进行对比分析。



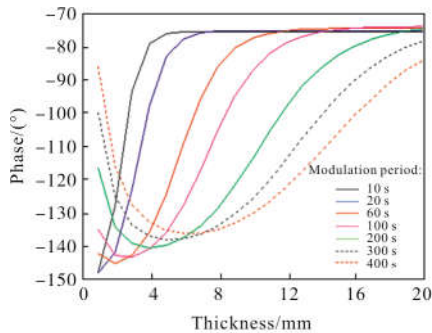
(a) 移相  $0^\circ$

(a) Phase-shifting  $0^\circ$



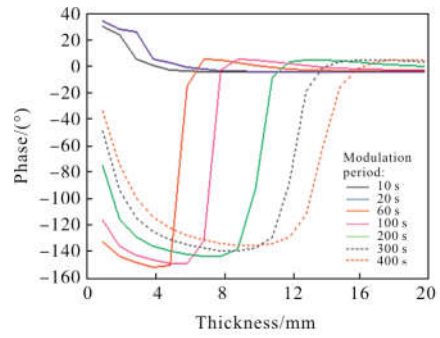
(b) 移相  $45^\circ$

(b) Phase-shifting  $45^\circ$



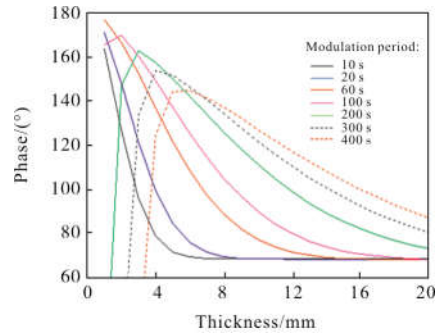
(c) 移相  $90^\circ$

(c) Phase-shifting  $90^\circ$



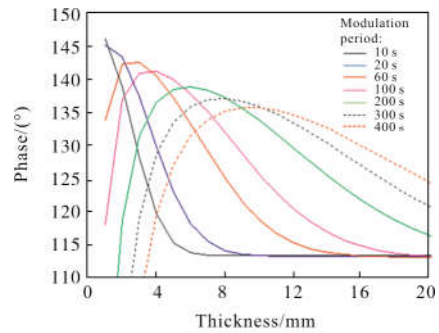
(d) 移相  $135^\circ$

(d) Phase-shifting  $135^\circ$



(e) 移相  $180^\circ$

(e) Phase-shifting  $180^\circ$



(f) 移相  $225^\circ$

(f) Phase-shifting  $225^\circ$

图 4 移相对相位的影响

Fig.4 Effect of phase-shifting on phase

从图 4 中可以看出,不移相到移相值为  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的过程中,相位曲线总的变化范围由原来的  $-175^\circ \sim -150^\circ$  变化到图(c)中的  $-145^\circ \sim -75^\circ$ ,即相位变化幅度从  $25^\circ$  扩展到了  $70^\circ$ ,相当于相位对厚度的灵敏度提高了近两倍。移相值为  $135^\circ$  时,对于较短的 10、20 s 周期的调制激励,相位变化幅度小,厚度分辨率低,而对于其他较长周期的激励,相位曲线的线性度和单调性又很差,不适合拟合关系式。移相  $180^\circ$  时,整个相位曲线与不移相时完全相反,相位曲线由谷

值变成正峰值,相位变化范围约为  $70^{\circ}\sim 170^{\circ}$ ,变化幅度达  $100^{\circ}$ ,相位对厚度的灵敏度比不移相时提高了 3 倍,各相位曲线的线性度较好,便于拟合关系式,且近线性段的厚度区间略有增加,使得单一调制周期的厚度检测范围有所提高。移相  $225^{\circ}$  时,相位曲线近线性段和死区范围略微右移,相位变化范围约为  $113^{\circ}\sim 143^{\circ}$ ,与不移相时的变化幅度相近。从移相的整体效果来看,移相  $180^{\circ}$  时相位灵敏度的提升效果最明显,提高了近 3 倍,相位差变化明显,有利于增强相位图的对比度,提高锁相热波检测技术的缺陷识别能力和准确度。

移相  $180^{\circ}$  后计算相位要求至少采集 1.5 个周期的温度序列,比不移相增加了半个周期的采集时间,但是计算出来的相位灵敏度高,增加了厚度分辨能力,此外调制激励装置开始工作时存在一个短暂的预热过程,此时采集到的温度序列可能含有较大的误差,而移相半个周期后可有效规避这一预热周期,采集到的温度序列更准确,实现了检测效率和检测效果的有效平衡。

从图 4(e)中可以发现:随着调制周期的增大,相位曲线近线性段的斜率逐渐降低,所覆盖的厚度范围不断增加并有所重叠,相位随厚度的灵敏度降低,而要对未知深度的缺陷进行检测,并不需要使用图中所有的调制周期进行激励,20 s 和 200 s 周期的相位曲线组合起来便可以覆盖 1~18 mm 的厚度检测范围,满足大部分厚度的检测需要,因此,在应用中,一般尝试两个调制周期即可判断出深度范围。

### 3 试验验证

为验证上述数值分析结果,开展后续检测试验,采用超声红外热成像检测平台对含平底洞缺陷的碳纤维板进行检测。

#### 3.1 试验平台介绍

平台主要由锁相激励系统、红外热像仪及计算机控制与处理系统组成。主要性能指标如下:加热功率 2 kW,可扩展至 8 kW,加热面积和角度灵活可调;调制频率 0~0.5 Hz,多级可调;电源使用 220 V/50 Hz 市电,采用数字功率控制技术;电磁辐射在 25 cm 之外满足长期安全操作要求。热像仪型号为德国 InfraTec 公司生产的 Vhr680 非制冷型红外热像仪,测温精度在  $30^{\circ}\text{C}$  时小于  $0.04^{\circ}\text{C}$ 。调制锁相检测系统

如图 5 所示。

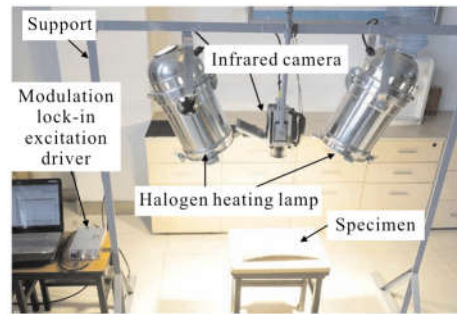


图 5 调制锁相检测系统

Fig.5 Modulation lock-in detection system

#### 3.2 含平底洞缺陷复合材料检测与分析

对五块含平底洞缺陷的碳纤维板进行检测,每块碳纤维板长 150 mm,宽 100 mm,设计厚度 6 mm。由于试件制作过程工艺复杂,厚度上存在较大的离散型,每块碳纤维板的实际缺陷深度、直径如表 1 所示。用酒精清洁试件表面,除去多余油脂,均匀涂抹黑色水溶性颜料,以方便热流在试件表面传导。碳纤维板背部缺陷如图 6 所示。

表 1 碳纤维板试件实际缺陷参数

Tab.1 Actual defect parameters of carbon fiber composite plate specimens

Specimen number	Specimen thickness/mm	Defect diameter/mm	Defect depth/mm
1	5.7	20	2.63, 3.67, 4.66, 5.16
2	6.0	30	3.23, 5.43
3	5.7	30	3.50, 4.50
4	5.8	40	2.93, 5.40
5	5.6	40	3.80, 4.55

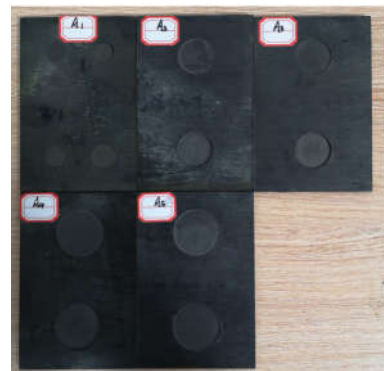
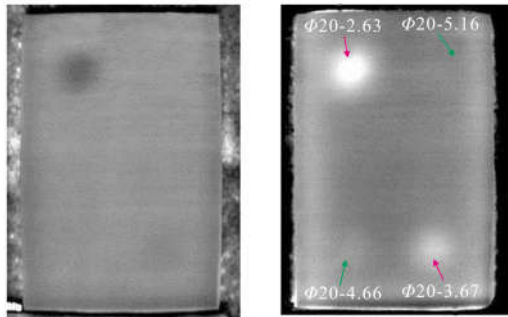


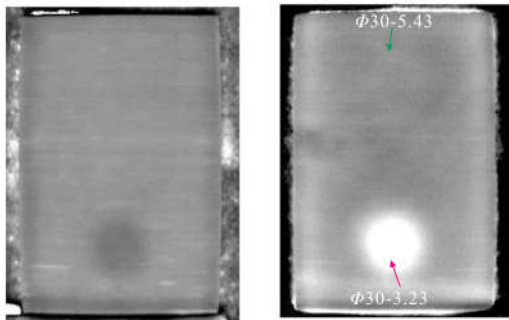
图 6 碳纤维缺陷试件

Fig.6 Carbon fiber defective specimen

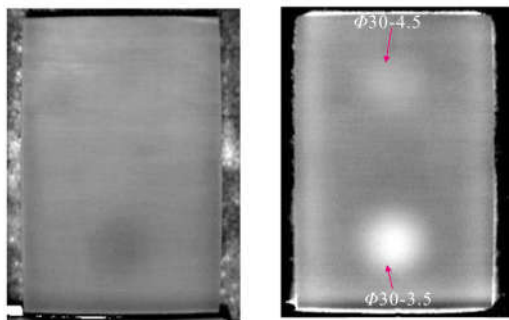
在仿真计算过程中,发现单一调制周期的热激励厚度检测范围有限。为增加缺陷检测的准确性,针对表 1 中的缺陷深度范围,试验分别选用调制周期为 10、20、60、100 s 的热激励对每块试件进行激励,计算不同调制周期下各个深度缺陷的相位。为方便计算,各个调制周期下固定采集 150 帧热图,即每次激励时,调整热像仪的频率,使得采样频率 $\times 1.5$ 倍调制周期=150 帧。首先提取第 1~100 帧的温度序列,用公式(2)计算各个像素的相位,得到不移相相位图,然后提取从第 51~150 帧的温度序列并计算相位,得到移相 180°的相位图与仿真结果对比。图 7 中左侧图



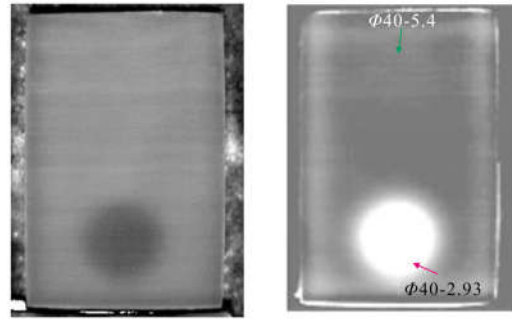
(a) 试件 1  
(a) Specimen 1



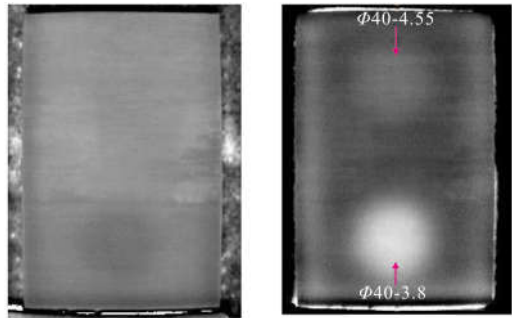
(b) 试件 2  
(b) Specimen 2



(c) 试件 3  
(c) Specimen 3



(d) 试件 4  
(d) Specimen 4



(e) 试件 5  
(e) Specimen 5

图 7 不同处理方法的检测结果对比

Fig.7 Comparison of test results of different processing methods

为不移相的检测结果,右侧图为移相 180°的检测结果,并用箭头和  $\Phi X-Y$  指出了实际缺陷的位置和大小, $X$  和  $Y$  分别表示直径和深度,红色和绿色箭头分别表示能检测出和不能检测出缺陷。

为验证移相技术对提高缺陷识别能力的有效性,缺陷深度基本上都设计在基体厚度的一半以上,属于较难检测的缺陷。从图中可以看出,移相 180°后检测出了共 12 个预制缺陷中的 8 个,而未移相只检测出了 5 个,且第五块试件下侧缺陷的对比度太低,勉强可以检出。在图 7(b)、(d)中,虽然无移相和移相的都只能识别一个缺陷,但移相后缺陷的光斑相对周围的对比度要比无移相的明显得到了增强,便于快速准确地判定缺陷的有无和位置。此外,其他几个缺陷的对比度也远不如移相后的效果好。在未检测出的 4 个缺陷中,缺陷深度与基体厚度差在 0.5~1 mm 之间,虽然 10、20、60 s 的调制周期在 1~7 mm 范围内有较好的线性和厚度-相位灵敏度,但由于厚度差太小,加上试验环境的影响,未能检出。 $\Phi 20$  的 4 个缺陷中只检测出 2 个, $\Phi 30$  和  $\Phi 40$  中都检测出

3 个,由于不同直径的缺陷深度设置基本一致,可以发现直径越大,越容易检测深处的缺陷。图 7 中的检测效果对比验证了移相技术对调制锁相热图增强的有效性。

## 4 结 论

针对锁相热波检测中,对于厚度差异类缺陷,相位灵敏度低、检测和识别能力有限,提出了基于移相技术的热图序列处理方法。通过数值计算和试验验证相结合的方法分析了移相技术对相位的影响,结果表明:移相  $180^\circ$  后计算的相位,在保证线性度和稳定性的基础上,随材料厚度或者缺陷深度变化的灵敏度提高了约 3 倍,相位差异变化明显,有利于增强相位图的对比度,提高锁相热波对缺陷的识别能力和准确度。为锁相热成像技术的发展和完善提供有力的支持。

## 参考文献:

- [1] Laborda A, Robinson A, Wang S, et al. Fatigue assessment of multilayer coatings using lock-in thermography [J]. *Materials & Design*, 2018, 141: 361-373.
- [2] Zhao H, Zhou Z, Fan J, et al. Application of lock-in thermography for the inspection of disbonds in titanium alloy honeycomb sandwich structure [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 69-78.
- [3] Wang F, Wang Y H, Liu J Y, et al. Theoretical and experimental study on carbon/epoxy facings-aluminum honeycomb sandwich structure using lock-in thermography[J]. *Measurement*, 2018, 126: 110-119.
- [4] Huan H, Mandelis A, Liu L, et al. Local-stress-induced thermal conductivity anisotropy analysis using non-destructive photo-thermo-mechanical lock-in thermography (PTM-LIT) imaging [J]. *NDT & E International*, 2017, 91: 79-87.
- [5] Feng Fuzhou, Min Qingxu, Zhu Junzhen, et al. Heating characteristics of metal fatigue crack in ultrasonic IR lock-in thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0704004. (in Chinese)  
冯辅周, 闵庆旭, 朱俊臻, 等. 超声红外锁相热像中金属疲劳裂纹的生热特性 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 0704004.
- [6] Li Haoran, Zhu Yuyu, Wu Li. Study and development of lock-in thermal excitation source for infrared thermography nondestructive testing system [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2017, 38(10): 91-95. (in Chinese)  
李浩然, 朱玉玉, 武丽. 红外热成像无损检测系统锁相热激励源的研制[J]. *自动化仪表*, 2017, 38(10): 91-95.
- [7] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(8): 3962-3965.
- [8] Sakagami T, Kubo S. Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3-5): 311-316.
- [9] Ishikawa M, Hatta H, Habuka Y, et al. Detecting deeper defects using pulse phase thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 57: 42-49.
- [10] Mu Yuwei. Numerical simulation and analysis of lock-in infrared nondestructive testing based on ANSYS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 38-42. (in Chinese)  
穆玉伟. 基于 ANSYS 的锁相红外无损检测数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 38-42.
- [11] Wang Zijun. Infrared phase nondestructive testing technology and its application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 98-99. (in Chinese)  
汪子君. 红外相位法无损检测技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 98-99.
- [12] Guo Jianguang, Gao Xiaorong, Guo Jianqiang, et al. On the dead zone of eddy current heating of lock-in thermography for unidirectional carbon fiber reinforced plastic[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(11): 1-6. (in Chinese)  
郭建光, 高晓蓉, 郭建强, 等. 单向碳纤维增强复合材料的锁相涡流热成像检测盲区[J]. *无损检测*, 2017, 39(11): 1-6.
- [13] Tao Shengjie. Research on infrared lock-in thermography and its application in quantitative detection of material defect [D]. Xi'an: Rocket Force University of Engineering, 2016: 22-29. (in Chinese)  
陶胜杰. 红外锁相热成像技术及其在材料缺陷定量检测中的应用研究[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2016: 22-29.