

# 调制法热波检测技术在复合材料构件无损检测中的应用

## Application of Modulation Thermal Wave Technology in Non-Destructive Testing of Composite Parts

中航工业飞机强度研究所 詹绍正 宁宁 陈霞



詹绍正

中航工业飞机强度研究所结构健康监测技术研究室工程师,曾先后主持并组织完成了多项飞机复合材料构件地面强度验证试验过程中的无损检测工作,现主要从事飞机复合材料结构原位无损检测技术研究及相关检测设备研制工作。

调制法热波检测技术采用某一频率的周期性调制信号对被测对象施加照射,红外热像仪检测物体表面返回的热波并获取红外热像图,通过热像图中物体表面热波相位和振幅的改变来判断被测对象的内部情况。

复合材料作为新一代的航空材料,具有重量轻,比强度、比刚度高,抗疲劳性能好,材料可设计性强等优点。目前已成为与铝合金、钢、钛合金并驾齐驱的四大飞机结构材料之一,其应用水平已经成为衡量飞机先进性的一个重要标志。正因为如此,国内外新研制的机型上复合材料用量飞速提升,复合材料已成为目前许多飞机的主要结构材料。

复合材料的大规模应用为航空器的减重和延寿带来了好处。同时,因为复合材料结构极易产生缺陷或损伤,这些缺陷或损伤在表面不可见或勉强可见,而内部的损伤面积却比较大,将会导致构件的承载能力大大

降低,若不能及时地检出损伤并对复合材料构件进行剔除或修补,将会导致飞机结构存在重大事故隐患。为此,在复合材料结构使用前以及使用过程中对其进行无损检测是极为重要的,复合材料结构中的缺陷或损伤能够被及时有效地检出是保证航空器安全的前提和基础。

针对复合材料结构的检测,国内外开展了一系列检测手段的研究工作,比如:超声检测、X射线检测、敲击检测、激光剪切检测、红外热成像检测等。复合材料结构由于具有导热性低、产生的瞬变时间长、对激励能量吸收好及有较好红外辐射的优点,非常适合红外热像检测技术。红

外热成像无损检测技术由于其快速、高效、非接触、无污染等优点,近年来得到了广泛的关注。

红外热成像检测技术按激励方式不同可分为脉冲法和调制法,调制法出现在上世纪90年代,它与脉冲法相比较具有抗干扰能力强、受不均匀加热和被测对象表面热辐射率变化影响小的优点,成为近年来结构红外检测技术研究的热点。本文针对光锁相热波检测技术(OLT)在复合材料结构损伤检测中的应用展开实验研究。

### 调制法热波检测原理

调制法热波检测技术采用某一频率的周期性调制信号对被测对象施加照射,红外热像仪检测物体表面返回的热波并获取红外热像图,通过热像图中物体表面热波相位和振幅的改变来判断被测对象的内部情况。

使用强度按周期规律变化的热源对被测物体进行持续激励,热流加载到构件表面,通过热传导对整个构件加热,同时采集特定时刻的多幅热图像;当被测物体中存在缺陷时,由于缺陷区域与无缺陷区域的热物理性质不同,构件中局部的缺陷会对热流传导产生影响,使得热量非均匀传播,此处热波将会发生散射和反射等,反射的热波与原有波相干涉而造成被测物有缺陷区域与无缺陷区域对应的表面温度的幅值和相位不同。利用红外热像仪记录表面温度变化,运用四点运算、信号重构、傅立叶变换等方法对采集的热图序列进行处理,提取相位和幅值,根据缺陷处与无缺陷处表面温度的相位与幅值的差异即可判定结构内部的损伤情况。

光源激励注入构件的热流如按正弦规律变化,其热流密度  $I(t) = P/2(1 - \cos(2\pi f_m t))$ ; 当构件可视作半无限体,则热流的传播可以用一维傅立叶热传导模型描述如式(1)。

$$\rho c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = k \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

其中,  $T$  为温度,  $\rho$ 、 $c$ 、 $k$  分别为构件材料的密度、比热和导热系数,  $x$  为热波的传播深度。

方程(1)的解析解可以表示为:

$$T(x, t) = T_0 \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f_m t\right), \quad (2)$$

其中,  $\mu = \sqrt{\frac{k}{\rho c \pi f_m}}$  为热扩散长度,  $f_m$  为调制信号的频率(调制频率)。

由热扩散长度  $\mu$  的表达式可以看出,调制频率越低,可检测的深度越深,但检测周期越长。因此为了获得良好的检测效果,必须选取合适的调制频率。

## 试验研究

### 1 试验设备

试验所采用的红外热成像检测系统为法国 CEDIP 公司(现美国 FLIR 公司)的非接触式材料无损检测工作站。主要由热像仪、激励装置(包括函数发生器和调制热源)、计算机及控制和采集系统组成,见图1。热像仪型号为 Silver 420M 型(内含锁相模块),其波长范围为  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ ,温度分辨率为 25mK(软件处理后可达到 1mK);函数发生器可产生正弦波、方波、三角波激励信号;调制热源为 2 个 1000W 的卤素红外灯,控制和数据采集软件为 ALTAIR-LI 软件,数据分析软件为 ALTAIR 软件。



图1 红外热成像检测系统组成

### 2 调制频率的确定方法

调制法热波检测技术中,调制频率是一个非常重要的参数,频率不同,热波的穿透能力不同,决定着可探测缺陷的深度和结构表面正常区域与缺陷区域形成温度场的差值不同,表现在热像图上为图像的对比值不同;因此,检测前需先确定调制频率。调制频率的确定可以通过分析计算、计算机仿真等多种方法;但在检测现场,可以通过以下 2 种方法选取调制频率。

第一种方法,不考虑缺陷类型对热波反射能力的影响,可根据被测对象需探测的缺陷深度和材料的相关参数,按公式(2)中的热扩散长度  $\mu$  来确定调制频率。据相关文献记载,幅值图像的探测深度接近于  $\mu$ ,而相位图的可探测深度大约为  $1.8\mu$ 。

第二种方法,是通过计算机扫频技术确定调制频率。此种方法需与脉冲成像方式配合使用,即事先用宽频谱的脉冲闪光灯对被测对象施加热激励,用热像仪记录下被测对象表面的温度场变化情况。再通过快速傅立叶变换提取各频率分量对应的热图信息,根据各频率分量下损伤的清晰程度确定出合适的频率。此种方法效率低、繁琐,适合于批量检测的前期信号探索。

ALTAIR-LI 软件中的 S-MODE 提供了扫频功能,系统可按用户指定的频率增量自动进行各频率分量对应热图信息的提取;图2为经过 ALTAIR-LI 软件中 S-MODE 功能转



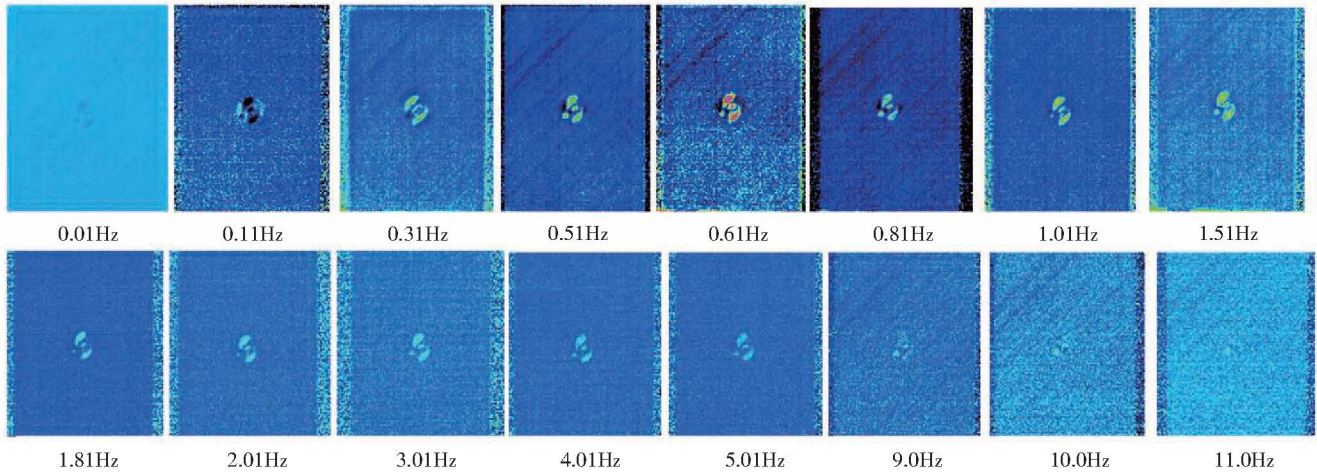
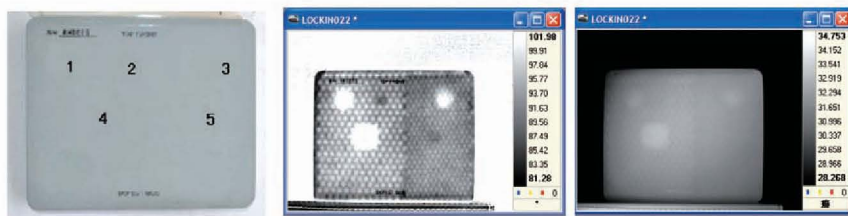
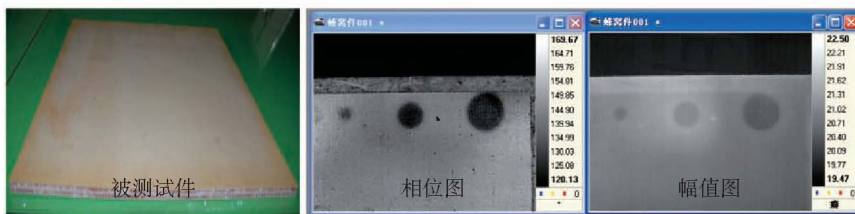


图2 同一损伤对不同调制频率的敏感性



(a) 碳纤维蒙皮+Nomex 蜂窝芯的 H 夹层结构及检测结果



(b) 玻璃纤维蒙皮+Nomex 蜂窝芯的 C 夹层结构及检测结果

图3 蜂窝夹芯结构及检测结果

换获得同一损伤在不同频率下的情况。由图中可见对于该损伤最佳的激励频率为 0.6Hz。同时,由图 2 中还可以看出,达到最佳调制频率后,随着频率增加,热波的穿透能力逐渐

减弱,损伤逐渐模糊;在满足探测深度的前提下,高频比低频获得的图像质量更高。

## 2 检测试验及结果

图 3 为蜂窝夹芯结构试块的调

制热波检测结果。图 3 中(a) 图为碳纤维蒙皮+Nomex 蜂窝芯的 H 夹层结构,其面板厚为 0.5mm,在其中分别预置了 5 个人工缺陷,其中 1、3 号缺陷为蜂窝芯与面板脱粘,2、5 号缺陷为面板分层,4 号缺陷为蜂窝芯切除。检测时采用 0.5Hz 的调制频率,通过相位图可完全检测到这 5 个缺陷,而且还能清楚获得该试件内部蜂窝芯间的拼接信息。

图 3 中(b) 所示为玻璃纤维蒙皮+Nomex 蜂窝芯的 C 夹层蜂窝结构,试件总厚度为 18mm,上下表面蒙皮厚度为 1.0mm,中蒙皮厚度为 1.5mm;在上、中、下蒙皮与蜂窝芯之间分别通过加防粘膜制作了一系列的脱粘缺陷。采用 0.4Hz 的调制频率进行检测,可清晰地探测到表面蒙皮与蜂窝芯间的脱粘缺陷;但对于中蒙皮与上下蜂窝芯间的脱粘缺陷未能检出。

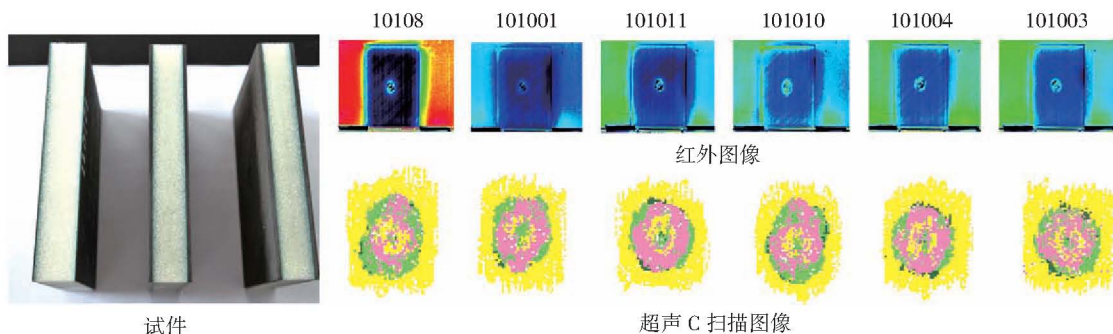


图4 泡沫夹芯结构冲击损伤检测结果

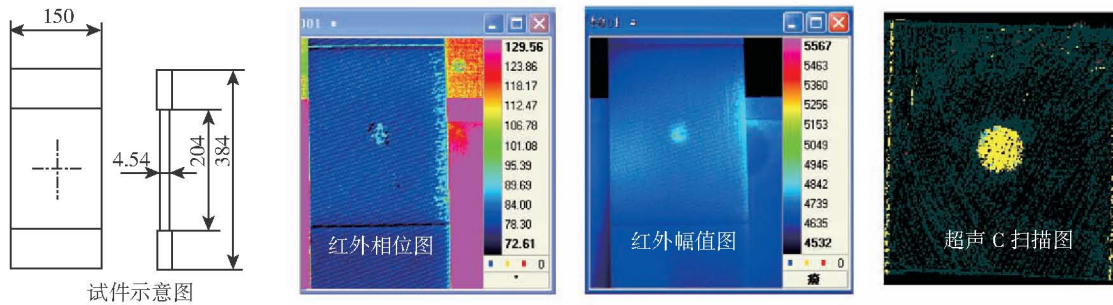


图5 碳纤维层板结构冲击损伤检测结果

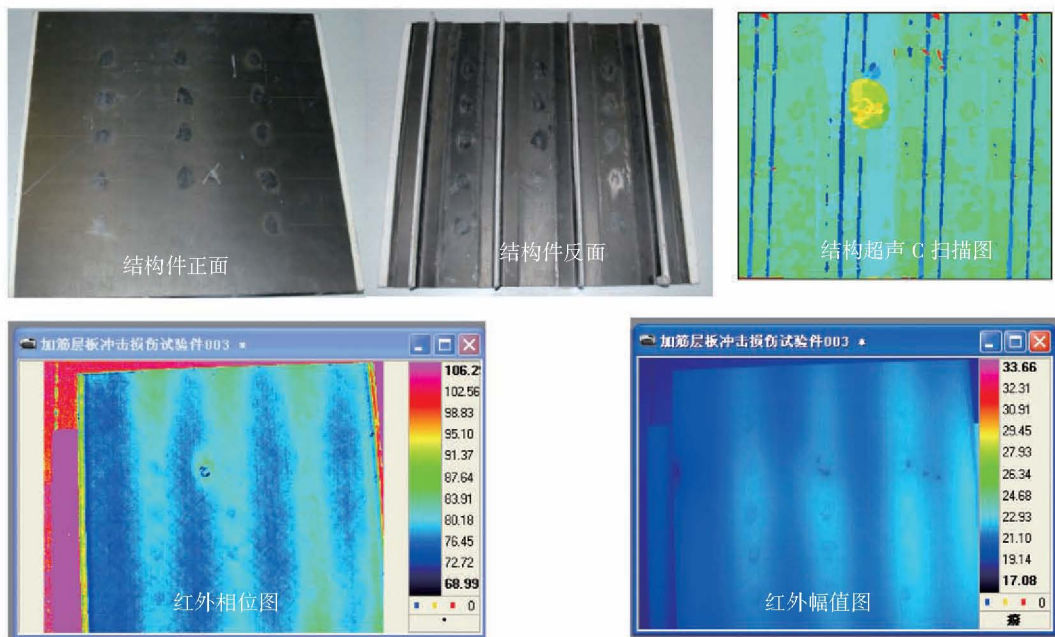


图6 碳纤维加筋板结构及检测结果

图4、图5所示的分别为泡沫夹芯结构和碳纤维层板结构冲击损伤的检测结果。图4所示的泡沫夹芯试件,面板碳纤维结构厚3.2mm,图5所示的碳纤维织物结构厚4.52mm。在低速冲击后,表面存在目视勉强可见的凹坑。对其实施频率为0.2Hz的调制热波进行检测。将红外检测结果与超声C扫描的结果比较,两者基本吻合。此外,通过红外检测还可清晰地获得结构的制作工艺信息和纤维的铺层方向,这些是常规超声C扫描方式所不及的。

图6所示的为碳纤维面板加“T”型筋条的复合材料加筋板结构,面板厚度为3.0mm,筋条缘条厚度为

2mm,筋条与面板固化在一起。该试验件经红外调制热波检测后,从相位图中发现结构中存在分层损伤。之后采用超声C扫描进行验证,其结果与红外检测相位图结果一致;但在红外检测的幅值图上,此损伤并不明显。

图7为一实际构件的红外检测案例,检测对象为碳纤维蒙皮加帽型长桁的盒段结构,盒段蒙皮厚度为2.04mm。该盒段进行疲劳损伤容限试验考核,在盒段完成一定试验周期后,将试验件拆卸到地面上,采用调制热波检测技术对其实施检测。检测时调制信号为频率0.1Hz的正弦波,光源功率为2000W,采样

频率为70Hz,采样周期为2个周期。由图7所示的相位图中发现盒段的一长桁上存在损伤,后经过超声C扫描检测证实该损伤为面板与长桁脱粘;而且在幅值图中该损伤是根本不可见的。

### 损伤的测量及分析

获得红外检测图像后,利用构件实际尺寸与图像像素间的对应关系可以实现对损伤的定量测量。具体采用的办法是通过换算求出某一已知真实尺寸与其在红外图像上像素值的比例系数,然后再通过该系数乘以图像中损伤区的像素数即可得到损伤的尺寸大小,见公式(3)。

$$d = \frac{\Delta 2 - \Delta 1}{L} \cdot (\Delta 2' - \Delta 1') \quad (3)$$

式中： $d$ 为被测损伤真实尺寸； $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 分别为已知尺寸对象在红外图像中两端点对应的像素值； $L$ 为该对象的实际尺寸值； $\Delta 1'$ 、 $\Delta 2'$ 分别为红外图像中被测损伤两端点对应的像素值。

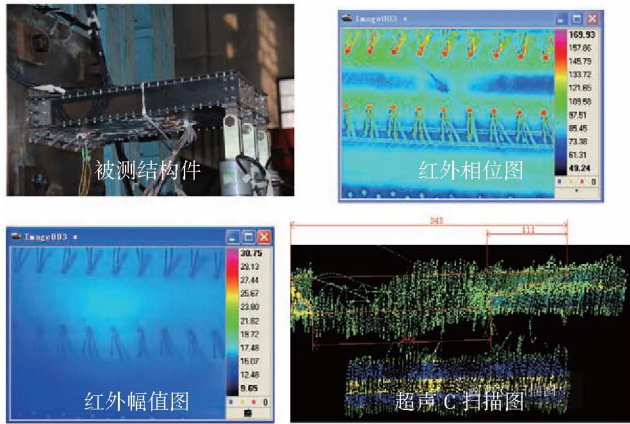


图7 复合材料盒段及检测结果

在读取图像像素值时,为减少读数误差,采用 MATLAB 对图像进行了简单的处理,对损伤区进行边缘提取,由此大大降低了人工读取像素值的判读误差,进而降低了损伤尺寸测量误差。图 8 为采用 MATLAB 处理

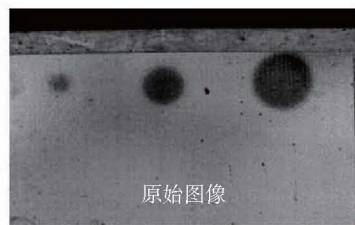
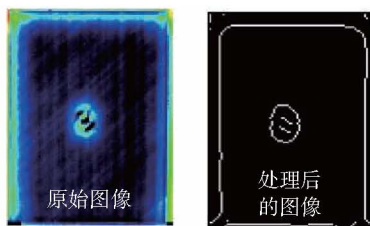


图8 制热波检测获得的原始热图与MATLAB处理后图像

后的图像和原始红外图像,由处理过的图像可轻构确定损伤边界尺寸。

图 8 中左图为低速冲击产生的自然损伤,该冲击损伤经超声 C 扫描检测测定为 28mm × 32mm ; 右图为人预置的人工脱粘损伤,3 个预置损伤的尺寸分别为 20mm、40mm、60mm ; 对两者红外图像中的

损伤进行边缘提取后,按公式(3)测得的左图中的冲击损伤尺寸为 24mm × 29mm,右侧图中各损伤尺寸依次为 18.47mm、39.1mm、60.86mm ; 对于右图中预置的人工损伤,红外检测的精度较高,误差在 1% 以内,而对于左图中的冲击损伤,红外检测的尺寸与超声 C 扫描相比误差最大达到了 14%。

分析以上原因,笔者认为,对于右图中的人工预置损伤,首先是损伤的边界清晰,其次由于其制作过程中采用的是加防粘膜模拟,产生的损伤形式单一,所以其对热波检测影响小,获得的结果误差较小。

而对于左图中由低速冲击产生的自然损伤,一方面是损伤形式复杂,其中包含着分层、疏松、纤维丝断裂等多种类型,因而考虑不同损伤对热波传导及反射的影响等,导致一部分损伤可能未能被完全检测出来,另一方面由于获得的红

外热图中存在一定的干扰信息,后期用 MATLAB 进行边缘处理时,阈值的选取也有可能使一部分损伤信息丢失。因此,各方面误差的累积导致最终测量的结果误差较大。

## 结论

本文对调制热波检测原理、调制

频率的确定方法及损伤的定量测量方法进行了介绍,并对复合材料构件展开了调制热波检测的试验研究。研究表明:

(1)调制热波检测技术能够对蜂窝结构、层板结构、加筋结构等多种复合材料结构实施有效的检测。与传统超声 C 扫描相比,调制热波检测技术不仅检测速度快,而且可以获得更多关于结构制作的工艺信息和纤维铺层方向等信息。

(2)调制热波达到最佳调制频率后,随着频率增加,热波的穿透能力逐渐减弱;在满足探测深度的前提下,高频比低频获得的图像质量更高;因此在实际检测中调制频率应选取最佳的检测频率。

(3)调制热波检测技术用于复合材料结构的检测,对于蜂窝夹层类的薄蒙皮结构,热波检测获得的相位图像和幅值图像均可反映结构内部的损伤情况,而对于厚度较大的层板结构、加筋结构,幅值信息由于受到热源能量及传导的限制,对埋藏较深的损伤无法有效探测。因此,调制热波检测技术,应重点考虑相位图像法。

(4)由于对缺陷的定量测量还

存在一定的误差,因此,调制热波检测技术更适合于复合材料结构生产线和外场条件下的快速筛选和排查检测领域,而对于生产制造阶段的严格的质量把关(涉及产品按标准验收/拒收问题)还须做大量的进一步研究工作。

(责编 侧卫)