

单模光纤与热图技术探伤 复合材料研究与应用

王祥林 蒋克俭 姜 涛

(西安交通大学机械学院, 西安 710049)

吴善鹏

(西安飞机工业公司, 西安 710089)

摘 要 利用单模光纤技术及热图技术, 针对面积大的复合材料块内的粘接质量缺陷进行了非接触在线实时探伤实验, 并对其新的机理进行了详细的分析与研究.

关键词 光纤, 热图, 红外.

1 引 言

单模光纤与热图技术探伤实验, 在复合材料无损探测领域内是一种崭新的检测方法. 单模光纤与热图技术优点是: 探测的覆盖面积大, 分辨率高, 操作简便, 结构紧凑, 可靠性好. 飞行器目前所用的新型材料有40%以上是复合材料, 其中的铝蒙皮蜂窝材料, 具有较高强度和良好的疲劳性能. 由于重量轻备受宇航和航空工业界的高度重视, 故得到了迅速发展和广泛应用, 但这种材料在制造过程中容易产生脱胶等缺点, 这样就有损于它的力学性能和结构强度. 目前在这个领域内, 国内、外学者进行了长时间的研究, 至今还停留于实验室内的试验阶段.

采用热图技术探伤复合材料的不足是对温差值小的粘接质量缺陷, 存在着图像分辨率不高的问题; 若采用光纤技术, 在相干光激励下所实施的探伤检测, 其优点是图像清晰、分辨率高, 缺点是探伤的整体面积较小.

本文作者应用光纤与热图技术通过实验实现了探伤整体面积大的成品复合材料, 弥补了单一探伤技术的不足, 并取得了满意的结果. 为在线实时探伤成品复合材料提供了一个较好的检测方式.

2 原 理

当加载复合材料试样 A 面时 B 表面有两种物理现象将发生: 一种是若物体内部某处存有缺陷, 其相应表面的变形量就不同于正常区域表面的变形量; 另一种现象则是 A 面加载的

温度升高, 热量经交界面向 B 面传导, 若交界面结合良好, 热流能均匀流向 B 表面, 那末 B 表面温度场分布是均匀的, 若交界面结合不好有缺陷存在, 那么就会直接影响热流均匀地流向 B 表面, B 表面的温场分布就相应地出现了异常现象.

探测仪将 B 表面的热辐射通过大气经扫描器将空间顺序变化的光子信息放大处理呈现在显示器上. 当热图缺陷区域内的温差值大于定值时, 微机即进行图像数据处理, 若小于定值时即单模光纤相移采样仪按照微机指令对该区形变量进行采样分析、比较变形前后的两幅或多幅相干波形状条纹等高图有无异常变化.

2.1 光纤辐射特性标称频率参数 r

光纤辐射特性标称频率参数的公式^[1]为:

$$r = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \leq 2.405 \quad (1)$$

式中 a 为光纤芯子半径, n_1 为光纤芯子折射率, n_2 为光纤包层折射率, λ 为光波的波长. 若 r 小于或等于 2.405 时只能基模传输, 所以光纤称为单模光纤. 单模光纤具有较低的空间噪声和较大的传递光振幅, 位相及偏振光的稳定性好. 单模光纤的传输模一般非常接近于高斯函数, 输出的光是非常好的相干光, 可以为散斑场提供物光及参考光. 比采用多模光纤所得到的图像条纹对比度要好, 抗外界干扰的能力强.

2.2 光纤移相机理

单模光纤利用压电陶瓷的逆压电效应或电致伸缩效应, 当压电圆柱体两极加电压后, 圆柱体扩展并将光纤拉长, 结果在激光通过光纤传播时光纤的长度和折射率发生了变化. 单模光纤中出现应变而引起对于 HE_{11} 模的正交偏振光相移 $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$, 一般可以写为:

$$\Delta\Phi_1 = k_0 n l [e_3 - (n^2/2)(p_{11}e_1 + p_{12}e_2 + p_{12}e_3)] \quad (2)$$

$$\Delta\Phi_2 = k_0 n l [e_3 - (n^2/2)(p_{12}e_1 + p_{11}e_2 + p_{12}e_3)] \quad (3)$$

式中, e_1 、 e_2 、 e_3 代表正交轴的主应变, e_3 在光纤的传播轴上; p_{11} 、 p_{12} 为光弹系数; k 为光波在真空中的波数; l 为光纤的长度; n 为光纤的折射率. 如果产生的压力场是均匀的, 并且径向对称, 那么径向应变 $e_1 = e_2 = e_r$, 光的相移为:

$$\Delta\Phi = k_0 n l \{e_3 - (n^2/2)[(p_{11} + p_{12})e_r + p_{12}e_3]\} \quad (4)$$

考虑压电换能器的特性, 上式可以变为:

$$\Delta\Phi = 2\pi k_0 n V N d_{33} \{1 - (n^2/2)[p_{12} - (p_{12} + p_{12})\gamma]\} \quad (5)$$

式中, V 为加在压电陶瓷上的电压, d_{33} 为加压方向的压电系数, N 为光纤的匝数, γ 光纤泊松比.

2.3 散斑条纹

散斑条纹可以表示成以下形式

$$I(x, y) = I_0 \{1 + m(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \sigma]\} \quad (6)$$

式中, I_0 为平均背景光强, $m(x, y)$ 为条纹对比度, σ 为初相位.

通过改变相位 σ 的值, 采用两步相移法, 即分别取 σ 为 0° 、 120° 、 240° , 得 I_1 、 I_2 、 I_3 三幅干涉图, 则:

$$I_1 = I_0 \{1 + m \cos [\Phi(x, y) + 0]\} \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 \{1 + m \cos [\Phi(x, y) + 2\pi/3]\} \quad (8)$$

$$I_3 = I_0 \{1 + m \cos [\Phi(x, y) + 4\pi/3]\} \quad (9)$$

由以上(7)式、(8)式、(9)式求解可得:

$$\Phi(x, y) = \arctan [\sqrt{3} (I_3 - I_2) / (2I_1 - I_2 - I_3)] \quad (10)$$

2.4 被测物体表面辐射的热值

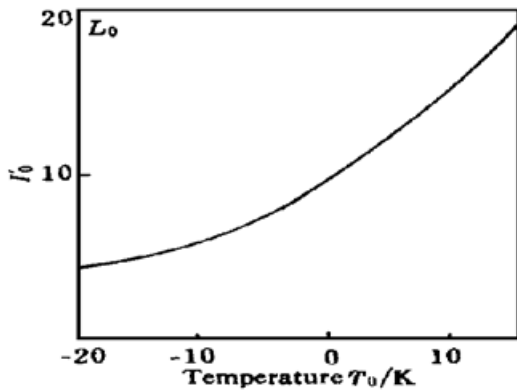


Fig. 1 Relationship between the heat value and temperature aperture

热值的公式为:

$$I'_0 = \tau_0 \epsilon_0 I_0 + \tau_0 (1 - \epsilon_0) I_a + (1 - \tau_0) I_{atm} \quad (11)$$

式中三项表示物体表面辐射的热值、环境辐射的热值和大气辐射的热值. 其中 τ_0 为大气吸收系数; ϵ_0 为物体表面的辐射系数; I_a 为 $T = T_a$ (T_a 为环境的热力学温度值) 时标定的热值 IU ; I_0 为 $T = T_0$ (T_0 为物体表面的热力学温度值) 时标定的热值 IU ; I_{atm} 为 $T = T_{atm}$ 时标定的热值 IU (热值即辐射到仪器的读数).

图1为热值与温度关系曲线.

2.5 质量缺陷区域边沿温差值 t

质量缺陷区域边沿温差值 t 的公式^[2]为:

$$t = \frac{b}{\ln \{ a \epsilon_0 \tau_0 / [q(l_0 + i_0 - I_a + \epsilon_0 \tau_0 I_a)] + 1/q \}} - 273 \quad (12)$$

式中, i_0 为某一热范围内的电平值(仪器的某一测量范围修正值); a 、 b 、 q 为取决实际光圈、滤光圈和扫描器类型的标定常数.

3 试 验

图2为单模光纤与热图技术探伤复合材料试验流程图, 控制系统均由微机指令有序操作. 被测物体试样是航空铝蒙皮蜂窝材料, 高度为400 mm, 长度为530 mm, 厚度为115 mm. 试样 A 面为加热面, B 面即为辐射面也为形变表面. 加载方式采用面移动扫描式, 这种加载方式可以使 B 表面所产生的温度差异能把物体内部的缺陷大小很清晰地反映出来, 也比较经济实惠, 若采用脉冲式注入方式加载, 虽探伤的缺陷深度大, 热图质量将会有显著的改善, 但目前它的费用高, 技术难度大, B 表面热波前的温度差要求约10~ 15°C方可实现缺陷显示, 因此在实用化上还比较困难.

热扫描器选用的是瑞典 AGA 公司红外系统装置(灵敏度为0.1°C). 因热扫描器接收到的热辐射有表面、反射、大气三部分组成, 所以装置设置在较暗的一间工作室里, 环境温度控制在15°C左右. 当微机对转换而成的多种热图进行图像处理时, 若缺陷的图像模糊, 温差又小于定值时, 微机将会指令单模光纤相移采样仪, 对该区域进行再探测比较被测物体在变形前后两幅或多幅相干波的形状, 根据它们产生的干涉条纹图有无异常变化来分析判断该区域内部的缺陷状况.

图3为单模光纤相移采样仪示意图. 图中配有一个小型的 He-Ne 激光器, 输出的光经分束镜分成二束光, 并分别被耦合到二根单模光纤中, 一根光纤提供良好的物体照明光, 另一根提供参考光. 被测物体的散斑图像由传像束光纤传至到 CCD 摄像机. CCD 摄像机的输出信号要经图像采集卡, 再送入微机进行图像处理. 相移器件通过计算机输出的数字控制信

号, 经 D/A 转换器及开关高压电源驱动压电陶瓷, 将使参考光纤相位发生变化, 达到移相目的. 试验结果与理论分析相符.

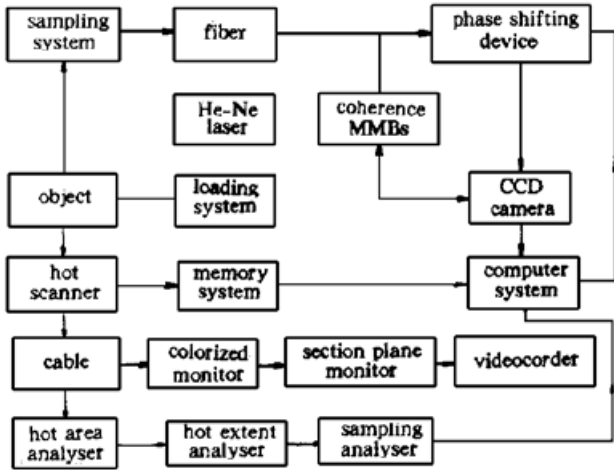


Fig. 2 Testing flow chart technique of singlemode fiber and thermogram

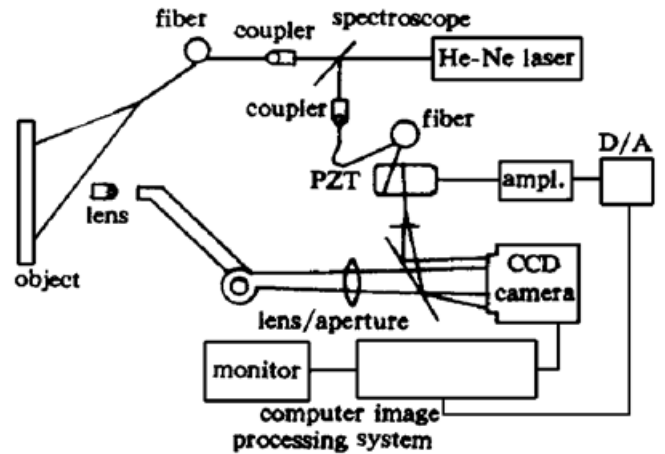


Fig. 3 Fiber phase shifping detection system

4 结果分析

图4(a)、图4(b)、及图5为单模光纤与热图技术对试样所探伤的试验结果. 图4(a)为

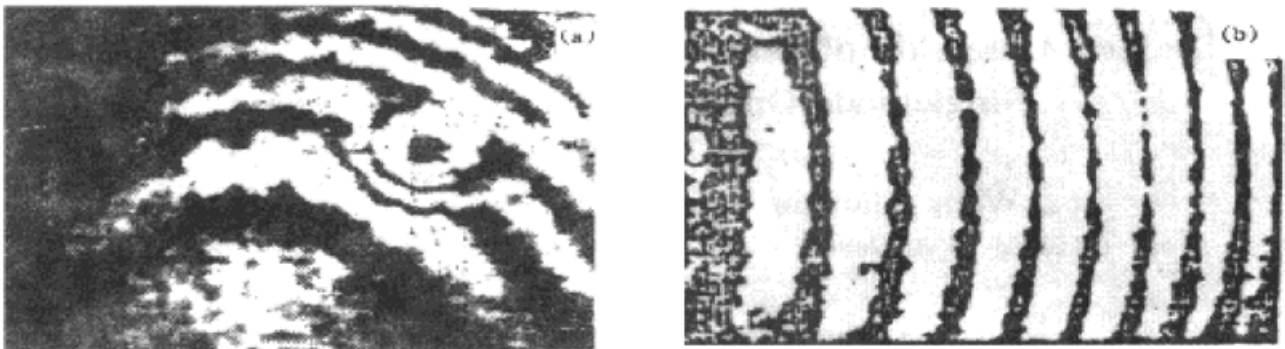


Fig. 4 (a) Displacement streak picture no accede to the fiberized phase shifping system, (b) Phase shifping picture accede to the fiberized phase shifping system

采用不加光纤相移技术而得到的位移干涉条纹图, 图中条纹在取向及间距上所产生的畸变点, 所呈现的形状、大小、位置完全相符于实物的脱胶部位, 条纹图的清晰度及分辨率优于普通散斑计量术, 其测量精度达到了 ($\lambda/100$). 图4(b)为采用光纤相移技术得到的相位图, 相位图可以通过光纤相移术得到, 当条纹级数增多时精度相对增加. 图5为采用热图技术得到的温场热图, 图中缺陷部位的直径为12 mm, 距表面 B 深度为7 mm、直径与深度比是2的缺陷区域的边沿温度与缺陷部位中心温度差约为0.8℃, 当温差值 t 小于定值时图像清晰度就可能下降, 定量分析精度也不如光纤相移计量术. 本文在探伤复合材料粘接质量缺陷实验中, 最大优点是采用了单模光纤相移技术和热图技术弥补了单一探测技术的不足.



Fig. 5 Experimental result using thermogram system

系统中单模光纤相移采样仪, 由于单模光纤技术的引入, 大大简化了光学元件, 使得光路调整简单、方便、灵活性大, 整体尺寸也变得小了, 在某种程度上降低了系统的防震要求. 由于技术的先进性, 记录时间短可以在明室操作, 还保持着全息干涉法的精度及灵敏度, 使得系统对环境干扰程度也变得不那么敏感了. 在相干光激励下, 用单模光纤给采样系统的散斑场提供物光和参考光, 用多模传像束来传输被测物的体图像, 用 CCD 摄像机及电子帧存器代替了全息干版的记录, 在探测的设计上采用了先获得干涉图再由传像束传输(光纤传输的光相位信息就变为了光强信号), 其结果是增强了系统的抗干扰能力.

结 论 单模光纤与热图技术在探伤复合材料应用与研究方面, 探测的面积大、探测精度高、环境适应性好、抗振能力强, 并具有体积小、结构简单等优点, 能够在线实时探测被测物体内部的质量缺陷.

参 考 文 献

- [1] 刘 伟, 闻 梅, 王祥林等. 单模光纤电子散斑干涉计量术及其在位移、应变测量中的应用. 光子学报, 1992, 21(5) ·415~ 419
- [2] 王祥林, 刘 伟, 王裕文等. 复合材料红外无损检测技术研究. 西安交通大学学报, 1994, 28(1) ·122 ~ 126

Defects Detection of Composite Material Using Technique of Singlemode Optical Fiber and Thermogram

Wang Xianglin Jiang Kejian Jiang Tao

(Academy of Mechanical Eng, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049)

Wu Shanpeng

(Xian Aircraft Industry Company, Xi'an 710089)

(Received 3 December 1997; revised 6 February 1998)

Abstract The defects survey experiment for the adhesion quality of composite material with large size has been carried out by using the techniques of single-mode optical fiber and thermogram. Its new mechanism is discussed and analysed.

Key words optical fiber, thermogram, infrared.