

文章编号: 1001-4888(2015)05-0577-06

囊体布热合缺陷的锁相热成像无损检测技术研究^{*}

程腾¹, 吴健雄², 张勇², 胡琦³, 曹鹏涛³
朱雷雷³, 王逊⁴, 张弦⁴, 张青川², 伍小平²

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027; 3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088; 4. 南京中迅微传感技术有限公司, 江苏南京 211300)

摘要: 囊体布热合缺陷的无损检测是系留气球生产过程中急需解决的关键问题。本文通过对锁相热成像检测技术的理论与实验研究, 设计了一套可现场应用的囊体布热合缺陷无损检测系统, 实现了热合缺陷的自动识别与定位, 甚至可以进一步区分热合缺陷的类型, 具有较高的可靠度和较强的抗干扰能力。该系统不仅可用于囊体布的热合缺陷检测, 还可广泛应用于相关材料或结构的无损缺陷检测中。

关键词: 无损检测; 锁相热成像; 缺陷

中图分类号: TN219; TN911.8

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-003

0 引言

系留气球是一种依靠气囊内部轻比重气体产生浮力, 并通过缆绳系缚于地面的浮空器^[1]。它具有开发周期短、研制成本低、滞空时间长、负载能力高、生存能力强等诸多优点, 在反恐预警、边境管理、环境监测、应急通信、旅游观光等领域有着广阔的应用前景^[2]。

系留气球一般由气囊、副气囊、尾翼和整流罩四大部分组成, 其成形工艺方法一般包含热合、胶接、缝合等^[3]。在生产过程中, 胶接和缝合工艺较为成熟, 热合工艺由于起步较晚, 其技术水平与国外存在一定的差距。两层或多层囊体布经过热合工艺处理后, 在热合交接处可能出现粘合强度不足、脱粘等质量缺陷, 极大地影响了系留气球的可靠性, 因此, 必须对囊体布的热合成形质量进行无损检测。

锁相热成像检测技术作为一种可应用于现场的快速、非接触无损检测方法, 已日益成为保证产品质量和运行的重要手段。它融合了红外和数字锁相技术, 能够避免试件表面形状和辐射率差异的影响, 具有较大的应用前景^[4-8]。蒋淑芳等人通过理论和实验研究, 证明了该技术用于检测固体火箭发动机试件绝热层脱粘问题的可行性^[9]。张伟等人利用数值模拟方法, 研究了该技术在检测复合材料缺陷时的可行性^[10]。葛丽等人通过有限元和实验, 研究了该技术在检测吸波涂层缺陷方面的能力^[11]。H. Y. Kwae 等人利用该技术检测核电站辅助系统中小口径管道内的薄壁型缺陷, 有效减少了核电站的维护时间成本^[12]。K. Strzałkowski K 等人利用该技术测量了 II-VI 型二元晶体的热扩散系数^[13]。本文针对系留气球气囊生产中的热合缺陷问题, 开展了基于锁相热成像检测技术的理论与实验研究, 分析了该技术检测囊体布热合缺陷的检测能力, 并设计了一套可现场应用的囊体布热合缺陷无损检测系统, 实现了热合缺陷的自动识别与定位。

^{*} 收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(11372300)资助

通讯作者: 张青川(1962-), 男, 博士, 教授。主要从事光测实验力学研究。Email: zhangqc@ustc.edu.cn

1 理论基础

作为一种主动式红外检测方法,锁相热成像无损检测系统的基本结构如图 1 所示,主要由红外热源、红外热像仪、函数发生器(输出正弦调制信号)、功率放大器(热源的功率补偿)、计算机(图像处理及锁相分析等数据处理),以及必要的机械结构组成。它的基本原理如图 2 所示^[4],红外热源被信号发生器调制为正弦型热信号,周期为 T 。该热信号对待测试件进行持续加热,试件表面将出现正弦型温度变化,可表示为:

$$T(x, y) = Ae^{i[\omega t - \Phi(x, y)]}$$

式中, A 为正弦型温度变化的幅值; $\Phi(x, y)$ 为相位。该温度场可由红外热像仪连续采集的热图像重建,即

$$A(x, y) = \sqrt{(S_1(x, y) - S_3(x, y))^2 + (S_2(x, y) - S_4(x, y))^2}$$

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{S_1(x, y) - S_3(x, y)}{S_2(x, y) - S_4(x, y)}$$

式中, $S_i (i=1, 2, 3, 4)$ 是由红外热像仪连续采集的 4 幅热图像,采样周期为 $T/4$ 。

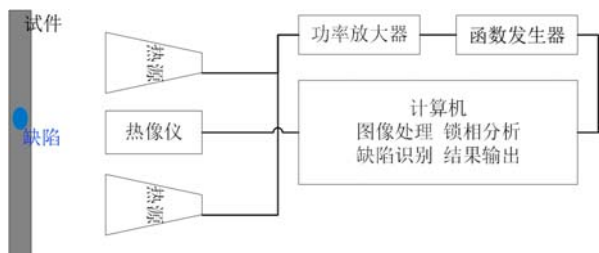


图 1 锁相热成像无损检测系统的基本结构

Fig. 1 Diagram of lock-in thermography NDT

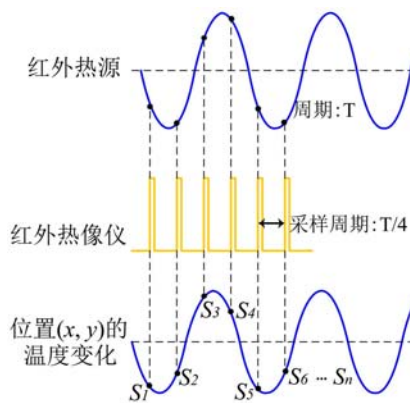


图 2 锁相热成像无损检测技术的基本原理

Fig. 2 Principle of lock-in thermography NDT

在锁相热成像无损检测中,因缺陷导致的图像对比度变化在相位图中更加清晰,因此,相位图比通常的热图像具有更重要的分析价值。缺陷定义为在相同的测试条件下,若试件某处与标准件相比存在相位差异,则认为试件该处存在缺陷,即

$$\Delta\Phi(x, y) = \Phi_d(x, y) - \Phi_s(x, y)$$

式中, $\Phi_d(x, y)$ 为试件在位置 (x, y) 处的相位; $\Phi_s(x, y)$ 为标准件在位置 (x, y) 处的相位。根据传热机理,相位差主要受红外热源的工作频率、缺陷类型和缺陷深度的影响^[11]。在一定的工作频率下,只要建立了试件在无缺陷时的标准相位图 $\Phi_s(x, y)$,即可根据相位差确定待测试件内部缺陷的形状和位置。如果进一步建立了试件缺陷深度与相位差的关系数据库,还可以进一步分析缺陷在试件内部的深度信息。需要说明的是,使待测试件产生相位差的缺陷类型很多,比如:试件内部掺入了传热系数更高或更低的杂质,试件内部存在孔洞等,需要具体问题具体分析。

2 实验方法

2.1 实验系统

本文建立的实验系统的硬件部分如图 3 所示,其中,图 3(a)显示了该系统的硬件连接图,主要由非制冷红外热像仪(空间分辨率: 640×480 pixels; 温度分辨率: 50mK; 响应波段: $8 \sim 14 \mu\text{m}$; 像元尺寸: $17 \mu\text{m}$; 帧频: 50Hz)、函数发生器(正弦波: $1 \mu\text{Hz} \sim 25 \text{MHz}$; 频率分辨率: $1 \mu\text{Hz}$)、红外光源(功率: 250W/个)和功率放大器组成;图 3(b)显示了该系统启动后的现场图,待测试件位于红外光源的正下方,并与

操作台面充分接触,以便能够充分有效地热交换。软件部分如图 4 所示,主要负责红外图像的预处理、锁相分析和结果输出。

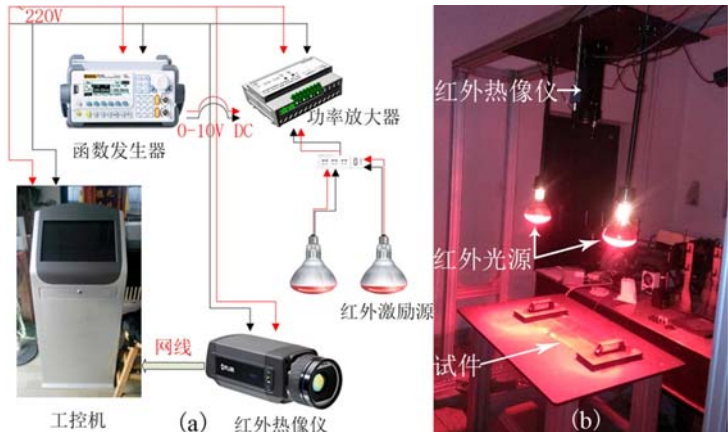


图 3 (a) 实验系统的硬件连接图;(b) 实验系统启动后的现场图

Fig. 3 (a) Electrical graph of experimental system; (b) Scene graph of experimental system after starting

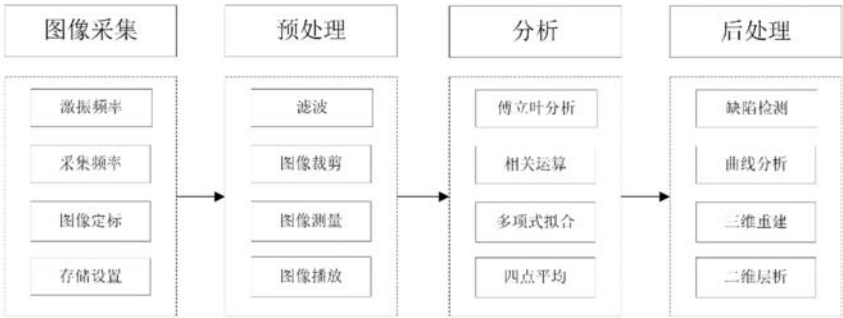


图 4 实验系统的软件架构

Fig. 4 Software architecture of experimental system

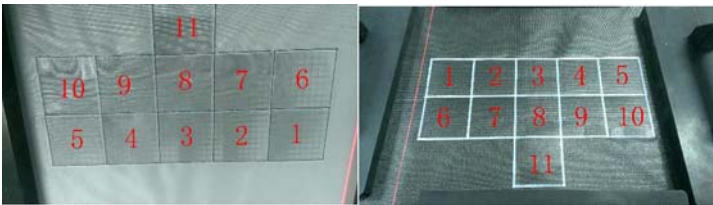


图 5 测试样品 T_A 和 T_B 实物图

Fig. 5 Pictures of test samples T_A and T_B

2.2 测试样品

系留气球由大量囊体布经热合、胶接等工艺逐块拼接而成,囊体布两层热合是其中最典型、最常见的热合工况,也是本文的重点研究对象。图 5 显示了两种不同的待测试件,它们都经两层热合工艺制作,但左图试件 T_A 由黑色和白色两种材质构成,右图试件 T_B 由相同黑色材质的囊体布构成。在每种待测试件上,均人工标记了 11 个不同的方形区域,其中,区域 1~5、7、9 内无缺陷;区域 6 内全部区域虚焊;区域 8 内含有一个气孔型缺陷;区域 10 内含有若干杂质型缺陷;区域 11 内部分区域虚焊。

3 实验过程及结果

在对测试样品进行热合缺陷的无损检测前,必须:

(1) 建立相位图的标准数据库

利用与测试样品结构相同(两层结构)、材质相同(黑、白两种材质)、处理工艺相同(直接热合),但无热合缺陷的标准件,分别测试该标准件在不同周期的红外热源加载下的热响应,并通过锁相分析,建立

相位图的标准数据库。这个数据库包含了红外热源在不同工作频率下,无热合缺陷囊体布的标准相位图。

(2) 选择最佳的工作频率

锁相热成像无损检测技术是通过相位差来检测物体的内部缺陷。相位差越大,缺陷检测的准确性越高。根据传热机理可知,相位差受红外热源的工作频率、缺陷类型和缺陷深度的影响。为了更准确地检测位于某深度的某种类型的缺陷,需要逐一测试不同工作频率下的相位差,并以获得最大相位差时的频率为最佳工作频率。需要说明的是,为了检测一定深度的缺陷,红外热源的工作频率一般较低,本文测试最佳工作频率时的红外热源频段为 $1\sim 1000\text{mHz}$,最佳工作频率为 100mHz 。

在建立标准数据库并选择最佳工作频率后,针对囊体布热合缺陷的锁相热成像无损检测过程比较简单,主要流程是:首先,设置信号发生器输出指定频率的正弦信号,红外热源在此信号的调制下对囊体布进行持续加热,同时,由红外热像仪记录囊体布表面的温度场变化,最后,通过锁相分析,提取相位图,计算相位差,从而识别热合缺陷。

图 6 显示了待测试件 T_A 和 T_B 在热载荷作用下的相位分布图,热载荷的正弦调制频率为 0.1Hz 。图 7 显示了图 6 中线段 A 和 B 上的相位分布曲线,以红色表示,其中,图(A)、(C)分别指试件 T_A 中线段 A、B;图(B)、(D)分别指试件 T_B 中线段 A、B。作为对比,图 7 还显示了同等工艺条件下标准试件的相位分布曲线,以蓝色表示。

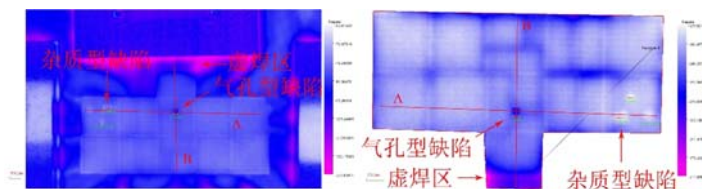


图 6 待测试件 T_A 和 T_B 在 0.1Hz 正弦调制的热载荷下的相位分布图(左图为试件 T_A ,右图为试件 T_B)

Fig. 6 Phase diagrams of test samples T_A and T_B

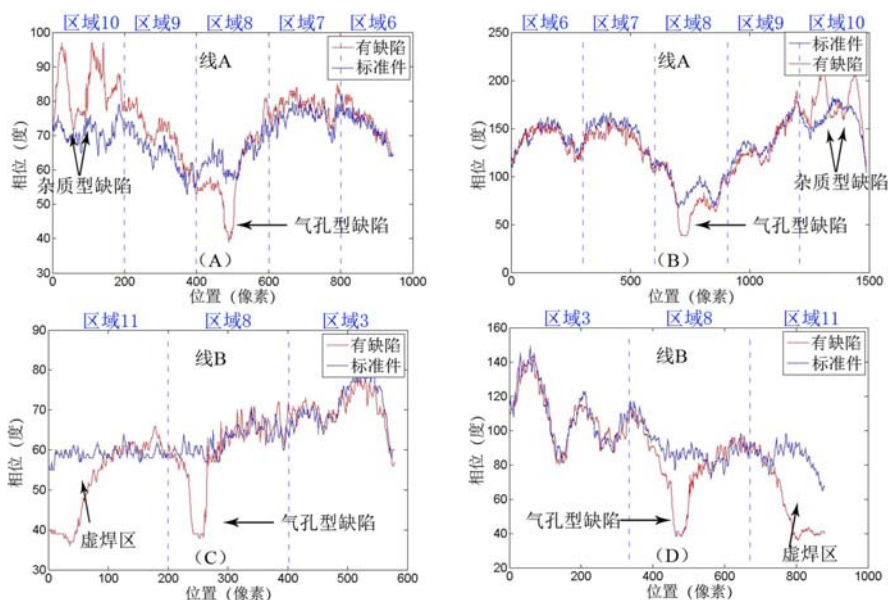


图 7 待测试件 T_A 和 T_B 相位图中线段 A 和 B 上的相位分布曲线,以红色表示(蓝色曲线为标准试件的相位分布)

Fig. 7 Phase distribution curves of lines A and B, colored in red, in phase diagrams of test samples T_A and T_B (blue curves are the standard test samples)

根据图 7,从试件与标准件的相位曲线差异可以看出:

1) 在区域 1~5、7、9 内,热合质量良好,无缺陷,因此,待测试件的位相分布曲线与标准件的位相基本一致,具有较高的吻合度。在区域 8、10、11 内,热合质量不好,有缺陷,因此,待测试件的位相分布曲

线在有缺陷的地方与标准件的位相存在明显的差异,位相或提前或延后。这表明:通过相位差可以有效地识别囊体布的热合缺陷,并具有较高的可靠度。

2) 在区域1~5、7、9内,无论是标准件还是待测试件,位相分布曲线起伏波动较大。这种相位波动主要由区域内的材料属性、成分以及外部热载荷的不均匀性导致,与试件是否存在缺陷无关,因此,识别缺陷的最佳判据是位相差,而不是位相值(或振幅值,同理)。

3) 不同缺陷类型导致的相位差异不同。根据缺陷材料的热传导系数差异,缺陷可能使温度变化的相位提前或延迟,从而有利于进一步区分缺陷的不同类型。本文中,囊体布热合缺陷通常有三种类型:

(A)杂质型缺陷,通常杂质的热传导系数高于囊体布材料,因此在杂质型缺陷处的相位差表现为相位提前;(B)气孔型缺陷,由于空气的热传导系数低于囊体布材料,因此在气孔型缺陷处的相位差表现为相位延迟;(C)虚焊,由于虚焊处的热传导系数低于囊体布材料,因此在虚焊区的相位差表现为相位延迟。与气孔型缺陷相比,因虚焊导致的相位延迟区域的面积更大,通常连成片而不是孤立的小区。从图7可以看出,区域8内存在相位延迟的尖峰,因此为气孔型缺陷;区域10内存在2个相位提前的尖峰,因此为杂质型缺陷;区域11内的相位延迟区域较大,因此为虚焊。

4 结论

根据本文的实验测试结果,可以得出如下结论:

1) 通过位相差,锁相热成像无损检测技术可以有效识别囊体布热合缺陷,具有较高的可靠度和较强的抗干扰能力。

2) 由于缺陷材料的热传导系数差异,缺陷可能使待测试件的相位比标准件的相位提前或延迟,因此,根据位相差的不同,可以进一步区分囊体布热合缺陷的类型,比如:杂质型缺陷、气孔型缺陷、虚焊等。

3) 锁相热成像无损检测技术不局限于囊体布热合缺陷检测,可广泛应用于相关材料或结构的无损缺陷检测中。

4) 锁相热成像无损检测技术建立标准数据库的工作量较大,同时,在实际测试过程中,由于工作频率较低,实验耗时较长,用于锁相分析的数据处理量大,较难实现处于移动状态的试件缺陷检测。

参考文献:

- [1] 高山. 气球载雷达结构总体设计[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(6): 487—491 (GAO Shan. Structural design of balloon-board radar [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(6): 487—491 (in Chinese))
- [2] 汪岸柳, 毛伟文. 美国系留气球载监视系统发展分析[J]. 西安航空学院学报, 2014, 32(3): 24—27 (WANG Anliu, MAO Weiwen. Analysis on the development of tethered aerostat surveillance systems of the USA [J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2014, 32(4): 24—27 (in Chinese))
- [3] 孙帆. 系留气球热合成形质量控制[J]. 航空标准化与质量, 2012(6): 48—50 (SUN Fan. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(6): 48—50(in Chinese))
- [4] Carlomagno G M, Berardi P G. Unsteady thermotopography in nondestructive testing [J]. Proc. 3rd Biannual Exchange, St. Louis/USA, 1976, 24: 33—40.
- [5] Busse G, Wu D, Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(8): 3962—3965.
- [6] Wu D, Busse G. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials [J]. Revue Générale de Thermique, 1998, 37(8): 693—703.
- [7] Choi M, Kang K, Park J, et al. Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography [J]. NDT & E International, 2008, 41(2): 119—124.
- [8] 姚中博, 张玉波, 王海斗 等. 红外热成像技术在零件无损检测中的发展和应用现状[J]. 材料导报, 2014, 28(7): 125—129 (YAO Zhongbo, ZHANG Yubo, WANG Haidou, et al. Development and application of infrared thermography in parts' NDT[J]. Materials Review, 2014, 28(7): 125—129 (in Chinese))
- [9] 蒋淑芳, 郭兴旺, 沈京玲 等. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热波无损检测[J]. 激光与红外, 2005, 35(8):

- 584—586 (JIANG Shufang, GUO Xingwang, SHEN Jingling, et al. Infrared thermal wave NDT on the disbonds of the heat insulated layer in solid propellant rocket motors [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(8): 584—586 (in Chinese))
- [10] 张炜, 刘涛, 杨正伟 等. 复合材料锁相红外热像法无损探伤技术研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 939—943 (ZHANG Wei, LIU Tao, YANG Zhengwei, et al. Study of lock-in thermographic NDT to inspect composite plates [J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(9): 939—943 (in Chinese))
- [11] 葛丽, 秦雷, 朱军辉 等. 吸波涂层缺陷的锁相法红外检测[J]. *宇航材料工艺*, 2014, 44(4): 81—85 (GE Li, QIN Lei, ZHU Junhui, et al. Detecting of defects in radar absorbing coating using lock-in thermography [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44(4): 81—85 (in Chinese))
- [12] Kwae H Y, Ju H K, Man G N, et al. On-power detection of wall-thinned defects using lock-in infrared thermography [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 280: 542—549.
- [13] Strzałkowski K, Streza M, Dadarlat D, et al. Thermal characterization of II-VI binary crystals by photopyroelectric calorimetry and infrared lock-in thermography [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 119(1): 319—327.

On the Lock-in Thermography Non-destructive Testing of Heat Sealed Capsule Body Cloth Defect

CHENG Teng¹, WU Jian-xiong², ZHANG Yong², HU Qi³, CAO Peng-tao³,
ZHU Lei-lei³, WANG Xun⁴, ZHANG Xian⁴, ZHANG Qing-chuan², WU Xiao-ping²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 3. China Electronics Technology Group Corporation No. 38 Research Institute, Hefei, 230088, Anhui, China; 4. Nanjing PMLAB Sensor Tech. Co., Ltd, Nanjing 211300, Jiangsu, China)

Abstract: Non-destructive testing (NDT) of heat sealed capsule body cloth defect is the key issue in captive balloon production and needs to be resolved urgently. Through theoretical and experimental study of lock-in thermography, a NDT system of heat sealed capsule body cloth defect was proposed to identify and locate the defect automatically. According to phase difference, lock-in thermography NDT system can even effectively identify the type of heat sealing defects and presents high reliability and strong anti-jamming capability. This system can not only be used to identify the heat sealed capsule body cloth defect, but also be widely used in NDT of related materials or structures.

Keywords: Non-destructive testing (NDT); lock-in thermography; defect