

红外热成像无损检测系统建立与试验分析

汪子君¹, 刘俊岩², 戴景民¹, 王 扬²

(1 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 哈尔滨工业大学 机械制造及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:介绍了红外热成像无损检测的原理,分析了主动式红外检测技术中激励光源光谱特性对试验效果的影响,利用 CEDIP JADE 红外热像仪与 IR928 红外热像仪采集红外图像序列,并以此为基础建立了红外热图像无损检测系统,开发了红外图像序列处理软件系统.试验结果表明,建立的红外无损检测系统及图像序列处理软件系统能达到国外同类技术水平.

关键词:红外无损检测; 红外图像序列; 光谱分析

中图分类号: TN219 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2011)02-0020-04

Establishment and Experiment of IR Thermography NDT System

WANG Zì-jūn¹, LIU Jùn-yán², DAI Jìng-mín¹, WANG Yáng²

(1 Department of Automation Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2 Department of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Principle of IR thermography non-destructive testing is introduced. Light source spectral in active infrared detection is analyzed in order to study the influence on the experiment. CEDIP JADE infrared camera and IR928 infrared camera are used to gather image sequences. The NDT system and the software of processing image sequences are established on the basis of these. The experimental results show that the established NDT system and the software system achieve international level.

Key words infrared thermography nondestructive testing; IR image sequence; optical spectrum analysis

0 引 言

红外热成像无损检测技术是近年来发展起来的新型无损检测技术,作为一种非接触、非破坏及直观的检测技术,广泛应用于航天航空、机械、电力、医疗等领域,成为保证产品质量和安全运行的重要手段^[1-4].红外相位无损检测技术采用调制加热方式,利用周期调制热流在缺陷或损伤构件及材料内部热传导的不均匀性引起的表面温度差异进行检测^[5].

2001年,法国 CEDIP 公司开发了红外锁相系统

“CEDIP JADE III”,该系统包括软件和硬件部分^[6].主动式红外无损检测中,激励光源对热图效果的影响较大,光源频率的影响也做讨论^[7].本文建立了国产化红外无损检测系统与 JADE 系统进行对试验,分析热激励光源的光谱特性对试验的影响,开发软件系统对 JADE 系统和所建立系统采集的红外图像序列进行处理.

1 红外热成像无损检测技术原理

相位法红外无损检测利用调制激励源在被测物

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(60776802/F01); 黑龙江省重点攻关项目(GB06A512)

作者简介: 汪子君(1981—),女,博士研究生, E-mail: wangziju@uestc.edu.cn

体内部产生周期热波, 由于物体内部缺陷产生的反射受到入射波的干扰而在物体表面形成一个可被红外热像仪记录的波形, 用红外热像仪采集多幅热图像, 经过图像序列信号重构, 得到被测物体表面温度变化信号, 提取被测物体表面各点温度变化的相位图和幅值图, 据此判定缺陷的存在和特征. 图 1 给出了采用红外相位法技术进行无损检测的原理, 当激励热流按照正弦规律变化时, 构件表面温度也按照正弦规律变化, 且缺陷位置对应表面的温度热波信号与无缺陷处对应表面的温度热波信号存在温度差异和相位差异.

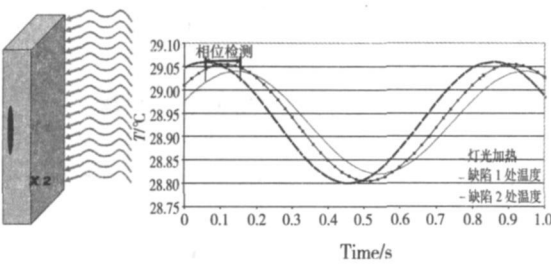


图 1 锁相热成像检测原理

2 红外无损检测系统组成

如图 2 所示, 一个典型的红外无损检测系统由以下几部分组成: ①热激励系统; ②红外热成像系统; ③红外图像采集、处理和分析系统.

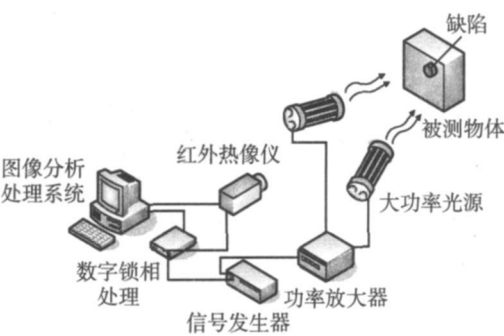


图 2 红外无损检测系统

2.1 激励系统

主动式红外无损检测系统必须要有一个热激励系统, 用以造成被测材料内部稳态或瞬态不均匀温度场, 使被测材料内部缺陷显示出来. 光源激励系统主要包括三部分, 一是函数信号发生器; 二是功率放大器; 三是卤素光源. 其工作原理是函数信号发生器产生需要的函数信号, 该信号控制功率放大器, 功率放大器驱动光源, 使光源光强 (功率) 按照函数发生器产生的信号规律进行变化.

研制光源激励系统的关键是选择合适的光源, 不同的光源对红外相位法热波检测的效果影响很大. 卤素红外线灯管升温快, 启动时间在 2 s 以内, 容易控制加热温度, 且热效率高, 具有光的辐射效应, 不加热空气, 相对亦其他红外线效率更高^[8]. 为了选定合适的光源作为红外相位法热波检测的光激励, 本文分别选取了英国制造的 CP62UK 卤素光源、飞利浦 R 125E27ES 红外光源和普通卤素光源进行傅立叶能量光谱分析, 分析不同波长段的光谱分布情况及光谱总能量与时间的变化关系. 为研制红外相位法热波无损检测的光激励系统提供依据. 图 3 给出了傅立叶光谱分析的试验系统示意图. 通过不同时间段的傅立叶光谱扫描, 得到了能量在不同波长上的分布, 用光度学亮度表示能量强度 (单位: 熙提, SB).

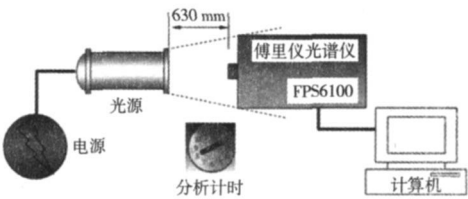


图 3 光谱分析试验系统示意图

图 4 图 5 分别给出了三种不同光源的傅立叶能量光谱分布. 随着扫描时间增加, 红外短波段和红外中波段光谱能量增加, 而波长 20 μm 附近的红外光谱能量逐渐减小, 大约在 60 s 左右, 光谱能量变化趋于平衡. 对于普通卤素光源, 在波长 20 μm 附近的光谱能量随扫描时间增加, 光谱能量迅速增大. 所选用的飞利浦 R 125E27ES 红外光源, 随着扫描时间增加, 在中波段红外光谱区域能量增加, 大约在 60 s 左右, 光谱能量变化趋于平衡. 在达到平衡时, 光谱能量之中在中波段红外光谱区域.

图 6 给出了 CP62UK 光源、普通光源和飞利浦 R 125E27ES 红外光源达到平衡后的傅立叶能量光谱分布. 对于三种不同的光源, 经过一定扫描时间达到平衡, CP62UK 光源的傅立叶光谱分布较均匀, 在红外波长段范围内能量分布较均匀, 在每个波段内均有高能量峰, 飞利浦 R 125E27ES 红外光源在中波段红外光谱区能量集中, 而普通光源中只在红外短波段和波长 20 μm 附近存在能量高峰, 而在中波段内, 没有高能量峰. 因此, 对于红外中波段响应的红外热像仪, 采用 CP62UK 光源和飞利浦 R 125E27ES 红外光源作为热激励源可显著提高红外热像仪的响应, 提高相位法红外热波检测技术的缺陷检测效果.

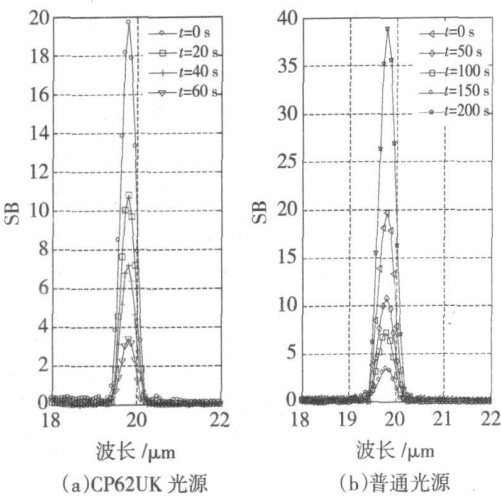


图 4 光源的傅里叶光谱

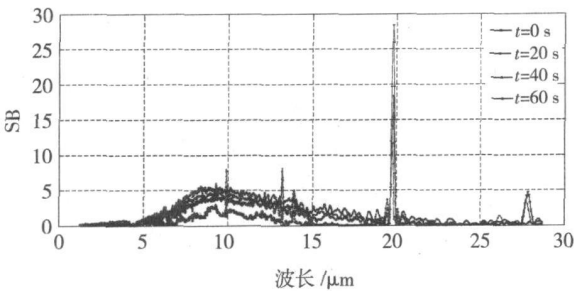


图 5 飞利浦光源的傅里叶光谱

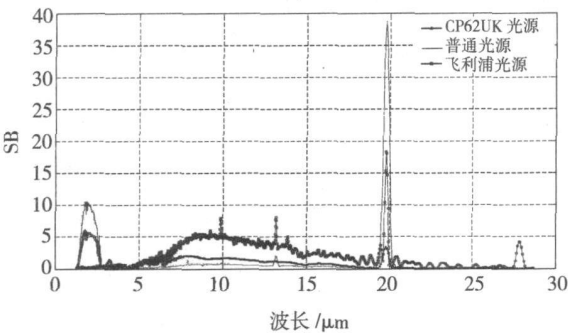


图 6 平衡后傅里叶光谱分布

2.2 红外图像采集系统

红外图像采集系统主要指红外热像仪,它负责把物体自身的红外辐射变成人眼可识别的可见图像,即把物体表面的温度分布转换成图像,以直观、形象的热图像显示出来.由于热像仪所获得的是物体表面二维温度场信息,因此普遍应用于红外无损检测.目前,许多国家(美国、英国、法国、瑞典、德国、日本等)都在生产各种用途的红外热像仪.现在的热像仪具有高速扫描、高温度分辨率、成像清晰、便携式、易操作等特点,为进行量化红外无损检测创造了必要条件.

本文试验系统采用两个系统进行,下面分别介绍系统组成:

1)法国红外无损检测系统.红外热像仪采用法国的焦平面阵列式 Jade MW R 550 制冷型,探测波段为 3.1~ 5.6 μm ,等效温差为室温 20 mK. CEDIP JADE III 红外锁相热像系统主要包括硬件处理系统和软件处理系统.硬件处理系统包括数字锁相处理器和 FP9800 图像采集器.

2)国产红外无损检测系统.红外热像仪采用国产 R928 型红外热像仪,属于非制冷焦平面热像仪,光谱范围 8~ 14 μm ,温度分辨率 0.06 $^{\circ}\text{C}$,测温误差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 或 1% (- 20 $^{\circ}\text{C}$ ~ 125 $^{\circ}\text{C}$).红外图像通过图像采集卡输入到计算机存储并用自行开发的软件锁相系统进行处理,提取红外热图序列的幅值图和相位图.光激励采用飞利浦 R125E27ES 红外光源.

2.3 分析处理软件系统

法国 CEDIP 软件处理系统包括 ALTA R LI 处理软件和 ALTA R 图像处理软件. ALTA R LI 软件具有快速采集和处理信号功能, ALTA R 具有图像增强、数据分析等功能.通过法国 CEDIP 热像仪记录的红外图像序列为热辐射的量化值和通过标定曲线将数字量化值 (DL) 转化为温度值两种形式,图像序列或图像采用 CEDIP 特有图像格式,以红外图像记录的热辐射数字量化值为基础,将图像序列文件记录的信息和图像数据进行顺序读取^[9].为实现对法国 CEDIP 公司 ALTA R 红外无损检测系统采集的红外图像序列进行处理与开发,自行设计了后处理软件系统,功能框图如图 7 所示,通过读取 CEDIP MW R JADE 550 红外热像仪采集的图像序列,进行提取表面热波信号相位等信息,并可进行信号重构.

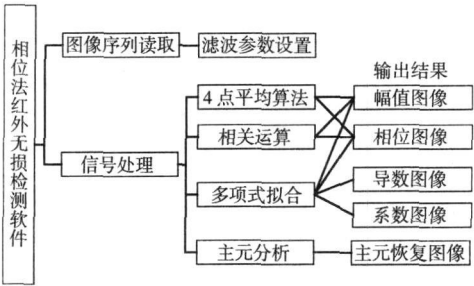


图 7 相位法红外无损检测图像序列处理软件功能框图

自行开发的红外图像序列处理软件,同样用于国产红外无损检测系统采集的红外图像序列的处理,用以实现缺陷的识别.软件系统包括滤波和热波信号幅值与相位信息提取算法,各算法得到的含缺陷信息图像以多种方式进行显示^[10-11],比较具体算法的效果

得到适合相位法无损检测试验的最优处理方式.

3 试验研究

采用 CEDIP 红外锁相系统和所建立的红外无损检测系统, 结合开发的基于图像序列处理的红外相位处理软件对 A3 钢进行无损检测试验研究, 比较两种系统获得的试验结果. A3 钢板表面喷涂哑光黑漆以避免金属光滑表面镜反射现象对试验的影响. 模拟缺陷试件示意图如图 8 所示. 圆孔直径都 10 mm, 方形和三角形边长 10 mm, 前三行缺陷的深度从左到右: 2.3 1.8 1.3 0.8mm, 第四行缺陷深度依次: 4.0 3.5 3.0 2.5mm. 表 1 给出了试验参数.

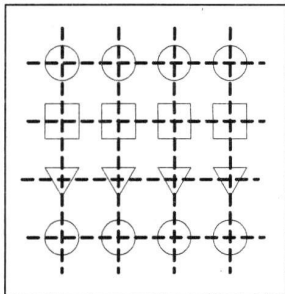


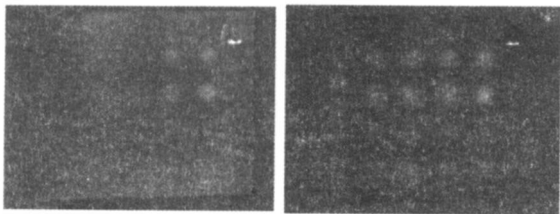
图 8 A3 钢试件模拟缺陷示意图

图 9 给出了两个系统进行检测的相位图像结果, 采用主元分析方法得到恢复的相位图像^[12], 所开发的红外图像序列处理系统得到的相位检测结果与 CEDIP 系统的检测结果基本一致.

表 1 试验参数

系统	调制频率/Hz	采样频率/Hz	帧数
CEDIP JADE III	0.025	37	4 440
图像序列处理系统			1 000

红外图像序列处理系统一般要实时采集红外图像并进行存储, 而后依靠计算机进行处理, 运算速度与采用的算法有关, 相对硬件锁相处理较慢.



(a)CEDIP 系统处理相位图 (b)图像序列处理相位图

图 9 相位图

4 结 语

通过对红外热成像无损检测原理分析, 建立无

损检测系统, 通过分析激励光源光谱特性对检测的影响, 确定了激励光源在特定光谱范围内的能量对检测的作用, 建立了光激励系统. 分别建立了由硬件锁相器和图像采集卡进行红外图像序列采集的部分, 并针对红外图像序列开发了软件处理平台以实现 对红外图像序列信号的多种算法处理. 试验证明, 所建立的红外无损检测系统可实现对红外锁相处理功能, 且红外图像序列处理软件系统得到的检测效果达到了国外同类技术水平.

参 考 文 献:

[1] MEOLA G, CARLOMAGNO G M. Recent Advances in the Use of Infrared Thermography[J]. Measurement Science and Technology 2004(15): 27-58.

[2] TEZA G, GALGARO A, FRANCESCA M om. Contactless Recognition of Concrete Surface Damage from Laser Scanning and Curvature Computation [J]. NDT&E International 2009, 42 240-249.

[3] MABROUK I F, GENEST M, SHI G, et al. Numerical Modeling for Thermographic Inspection of Fiber Metal Laminates [J]. NDT&E International 2009 42 581-588

[4] ZAUNER G, MAYR G, HENDORFER G. Comparative Defect Evaluation of Aircraft Components by Active Thermography [J]. Proc. of SPIE- IS&T. 2009 7251 72510J-1-72510J-9

[5] 徐川, 霍雁, 李艳红, 等. 锁相热成像无损检测方法的基础实验研究 [J]. 无损检测, 2007, 29(12): 728-730.

[6] BRÉ MOND P, POTET P. Lock-in Thermography: a Tool to Analyse and Locate Thermomechanical Mechanisms in Materials and Structure [C] // Proceedings of SPIE, Thermosense XXIII 2001, 4360 560-566.

[7] KRAPEZ J C, TAILLADE F, BAIAGEAS D. Ultrasound lock-in Thermography NDE of Composite Plates with Low Power Actuators Experimental Investigation of the Influence of the Lamb Wave Frequency [J]. QR II, 2005 2(2): 191-206.

[8] 刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验 [J]. 红外与激光工程. 2009, 38(2): 346-351

[9] 刘俊岩, 王扬, 戴景民. 基于图像序列的红外锁相热像检测技术研究 [J]. 激光与红外. 2008, 38(7): 654-658.

[10] LRAPEZ J C. Compared Performances of Four Algorithms Used for Modulation Thermograph [C] // QIRT' 98 Quantitative Infrared Thermography 4, Lodz Poland, 1998 7-10

[11] SUNG Quek, DARRYL A mond, LUKE Nelson Tim Barden. A Novel and Robust Thermal Wave Signal Reconstruction Technique for Defect Detection in Lock-in Thermography [J]. Meas Sci Technol 2005, 16 1223-1233.

[12] MAR NETT I S, GRNZATO E, BISON P G, et al. Statistical Analysis of IR Thermographic Sequences by PCA [J]. Infrared Physics & Technology, 2004(26): 85-91