

# 闪光灯热激励红外热波成像无损检测设备及应用

江海军,陈 力

(南京诺威尔光电系统有限公司,南京 210046)

**摘要:**介绍了基于闪光灯热激励的红外热波无损检测设备,该系统采用自主研制的非制冷型热像仪,通过灯管对称排列与反光灯罩设计使得闪光灯能量的均匀性得到提高,通过红外图像降噪处理和数据重建使得红外图像信噪比得到提高。研制的热激励电源包括多种脉冲宽度控制方式,系统的控制软件可对热波图像进行采集及数字处理,增强了图像质量;操作界面采用触屏控制,使用方便。该台式系统具有高能量和完整的图像处理能力,设备便携、结构紧凑,利于在役及原位检测。

**关键词:**闪光灯热激励;脉冲热激励;热波成像

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2017)09-0057-04

## Application of Flash Thermal Excitation Infrared Thermographic Nondestructive Testing Equipment

JIANG Haijun, CHEN Li

(Novelteq Ltd., Nanjing 210046, China)

**Abstract:** The infrared thermographic nondestructive equipment based on flash thermal excitation device was introduced. The system adopts the independent development of uncooled infrared thermal imager, the lamp symmetrical arrangement and reflective shade design makes the uniformity of the flash energy increase, the signal-to-noise ratio of infrared image is improved by infrared image denoising and data reconstruction. Independent thermal excitation power supply includes a variety of pulse width control method. The control software of the system can perform thermal wave image acquisition and digital processing to enhance image quality, and the interface adopts touch screen control, which is portable and compact. The system facilitates the detection of in-service and in-situ.

**Key words:** flash thermal excitation; pulse heat excitation; thermographic

热波成像检测技术与其他常规无损检测技术相比具有独特的优越性,具有检测速度快、单次检测面积大、和试件不接触、检测结果以图像形式直观显示等优点,特别适合在役及原位检测,目前已普遍应用于航空航天、国防军工等领域<sup>[1-3]</sup>,并开始向轨道交通、新能源等领域普及<sup>[4-5]</sup>。

红外热波无损检测是一种主动式红外检测技术,其采用热激励源对试件表面进行加热,在热流向试件内部传播的过程中实现对缺陷的检测。按时域进行分类,热激励主要有3种形式,包括短周期脉

冲、长周期脉冲和交变调制。其中,短周期脉冲激励具有分辨率高、反应速度快的优点,特别适合高导热率的样品,如金属、碳纤维等,或者是薄层样品,如蜂窝结构件和各种涂层等<sup>[6-7]</sup>,短周期脉冲激励是国际上主流的热激励方法<sup>[8]</sup>。

采用光热效应实现短周期热激励的方法主要有大能量闪光灯、脉冲激光器与扫描连续激光等<sup>[9]</sup>,其中,大能量闪光灯对便携设备而言更具有实用性。但目前市场上仅有的便携式闪光灯热波无损检测设备的体积大,并由多件设备组合,单人很难操作,加上设备依赖进口,不仅价格昂贵,且受西方国家严格的出口管制。

闪光灯激励热波成像无损检测技术采用短脉冲热激励的方式对样品表面进行加热,产生的热脉冲向样品内部传播,样品内部的非均匀性,如脱粘、裂

收稿日期:2016-12-16

基金项目:科技部中小企业技术创新资助项目(14C26213201110)

作者简介:江海军(1988—),男,硕士,主要从事红外无损检测技术研究工作

通信作者:江海军, hjiang@novelteq.com

纹、锈蚀、损伤等都会扰动热波的传播,从而影响到样品表面的温度场分布。笔者将样品表面温度随时间变化的过程用红外热像仪记录下来,通过算法对该红外热图序列进行分析处理,从而实现对样品内部性状的评估。因此,该仪器综合了调制热激励、红外成像、信号检测、图像处理等多方面的技术。

## 1 设备介绍

图1为闪光灯热激励红外热波成像无损检测设备的结构示意,其主要由3部分组成:闪光灯热激励系统、红外图像采集处理系统、用于协调热像仪采集与闪光灯触发时间的同步触发器等。

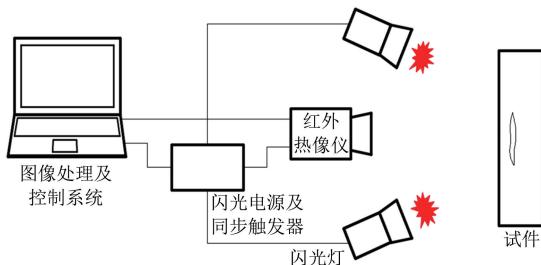


图1 闪光灯热激励红外热波成像无损检测设备的结构示意

### 1.1 热激励源

系统采用自主研制的适合热波成像技术的闪光灯系统,该系统具有能量大、体积小、轻便及安全可靠等特点。闪光灯能量由软件系统控制,闪光脉冲宽度连续可调,有3种控制模式,包括自由模式(闪光脉冲宽度大,可最大限度释放电容器所储存的能量,适合一些需要高热激励能量的场合,如热吸收差、导热率低及较厚的样品)、固定周期模式(闪光脉冲宽度从1 ms起精确可控,适合检测导热率大的样品,如金属试件及蜂窝试件等薄壁制品)、固定能量模式(每次闪光的总能量固定,可自动补偿闪光系统的能量衰变,适合需要精准控制检测过程的场景,如生产线上的质量控制)。

### 1.2 红外图像采集

热像仪为热波成像无损检测设备的核心部件,通常分为制冷型和非制冷型。制冷型热像仪具有较高的图像质量,特别是标志噪声水平的热灵敏度低,热响应速度快,可以运行在较高的帧频下,有利于高速热波成像;同时,制冷型热像仪是凝视型电子结构,整幅图像同时采集,有利于后期的图像处理。但是制冷型热像仪的体积大、质量大,且价格昂贵,不利于热波无损检测技术的推广,因此,在多数情况下都是采用非制冷型热像仪。由于非制冷型热像仪的噪声水平较高,通常为制冷型热像仪的2倍,为了弥

补这一缺陷,笔者在整体系统的设计上进行了多处优化。由于市售的非制冷热像仪都是为常规应用所设计的,在热波成像方面不能最大限度地发挥其潜能,为此研制了适合热波无损检测设备应用的专用热像仪,所有热像仪芯片的功能都可以任意设置,并配合以特别适合热波成像的图像处理及降噪功能。另外,对专用镜头的设计进行优化,大幅增加光通量。综合以上几点措施,热像仪实测的热灵敏度可优于30 mK。为了提高检测信噪比,闪光灯最大闪光能量为12 800 J,相对于进口设备的最大闪光能量9 600 J而言,最大闪光能量提高了33.3%,系统的性能得到进一步提高。

### 1.3 图像处理及系统组成

热激励源、热波图像采集、图像显示等都需要通过软件进行控制与处理,研制的基于Windows操作系统的软件ThermPulse具有热波成像专用的系统控制与多种信号处理功能,其具有界面清新、简单易用、触屏控制、操作方便等优点。ThermPulse软件主要功能模块如表1所示,可以实现包括闪光能量、触发同步、闪光周期控制、热像仪采集时间、帧频、背景采集等的控制,以及对红外图像的处理、分析等。

表1 ThermPulse软件主要功能模块

模块	功能
热像仪采集模块	热像仪接口连接、接口通信、声控方式、盲元校正、非均匀性校正、漂移校正、畸变校正、数据采集
闪光灯控制模块	热像仪帧频、积分时间控制,闪光灯激励与图像采集同步,闪光灯脉冲宽度、能量控制
图像显示模块	热像仪图像实时显示,图像存储、读取,播放图像,图像显示方式:手动、自动
图像处理模块	图像实时压缩、图像快照、图像去噪,图像数据拟合、重建,原始图像、拟合图像、一阶导图像、二阶导图像,图像减背景、图像伪彩色,图像线性变换、图像区域选择,图像旋转、拼接、报告生成

图2为闪光灯热激励红外无损检测热图序列,在采集热图序列前需要获得背景图像,以利于后续图像处理,闪光过程需要与采集过程保持同步关系,根据试件的不同决定采集帧数(采集帧频×采集时间)。

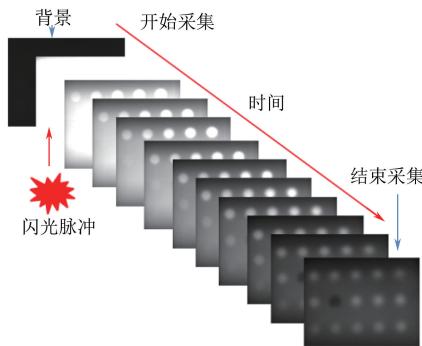


图 2 闪光灯热激励红外无损检测热图序列示意

#### 1.4 台式闪光灯激励热波成像系统

研制的台式闪光灯激励热波成像系统具有高热激励能量、完整图像处理功能的特点,可以选配多种热像仪,包括非制冷、制冷、高分辨率热像仪等。系统的检测视场范围约为  $300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ,闪光灯单次触发最大能量可达 12 800 J。红外热像仪采集得到的红外图像输入到计算机,通过 ThermPulse 软件系统进行处理分析。闪光灯电源及控制系统集成在可移动机柜中,闪光灯激励红外无损检测设备外观如图 3 所示,系统可采用大屏触摸显示器进行操作,同时也配有键盘鼠标,显示屏的俯仰角度可任意调节。测试单元可以手持操作,但通常安装在测试平台或者助力臂上,以便根据测试对象进行位置与角度的调整。台式闪光灯热激励热波成像系统的主要参数如表 2 所示(可检测材料为金属、非金属、复合材料)。

表 2 台式闪光灯热激励热波成像系统的主要参数

参数	规格
热激励能量/J	12 800(最大)
闪光脉冲宽度/ms	1~30(可调)
探测器类型	非制冷/制冷焦平面
探测分辨率	$384 \times 288(640 \times 512)$
最大帧频/Hz	100 或 200(全幅)
检测面积/cm	$30 \times 40$
显示器	22 英寸触摸屏
尺寸(长×宽×高)/cm	$39 \times 30 \times 59$ (检测单元), $55 \times 55 \times 105$ (机柜)
质量/kg	8(检测单元), 25(机柜)
电源/V	110~220 AC
功耗/W	600(最大)

#### 1.5 便携式系统

由于热波成像技术具有非接触、快速成像等特点,特别适合于外场的在役原位检测,因此设备的便携性显得十分重要。研制的便携式闪光灯热激励红外热波无损检测设备采用了高度集成的设



图 3 闪光灯激励红外无损检测设备外观

计,便于单人操作。便携式闪光灯热激励红外无损检测系统外观如图 4 所示,闪光灯电源由锂电池供电,适合在没有市电的地方使用,一次充电可使用超过百次,电池可更换,不仅安全,还免除了移动设备时到处拖着电缆的烦恼。测试单元集成了闪光灯、图像采集处理及显示等功能,可由单手握持,另外一只手用来操作,也可以安装在三角架上。该系统的主要参数如表 3 所示(可检测材料为金属、非金属、复合材料)。



图 4 便携式闪光灯热激励红外无损检测系统外观

表 3 便携式闪光灯热激励红外无损检测系统

参数	规格
热激励能量/J	6 400(最大)
闪光脉冲宽度/ms	1~30(可调)
探测器类型	非制冷焦平面
探测器分辨率	$384 \times 288$
最大帧频/Hz	100
检测面积/cm	$22 \times 30$
显示器	10.4 英寸触摸屏
尺寸(长×宽×高)/cm	$31 \times 23.6 \times 31$ (探测单元), $23 \times 20 \times 24$ (电源)
质量/kg	2.5(探测单元), 8.5(电源)
电源/V	110~220 AC/锂电池

#### 2 检测结果

为了验证设备的有效性,对一系列不同材料和结构的试件分别采用台式和便携式系统进行检测。

复合材料人工试件检测结果如图 5 所示,在一块 20 mm 厚平板的背面上有 15 个不同深度的平底孔,孔径全为 20 mm,孔底到表面的厚度从 1~5 mm 逐步增大,其中一个孔里注入了水,但没有注满。通过台式设备的检测可以清楚地显示出这些平底孔,并可以分辨出注水的孔。红外热像的图像采集时间为 30 s,显示图像为第 25 s 处的一阶微分图。

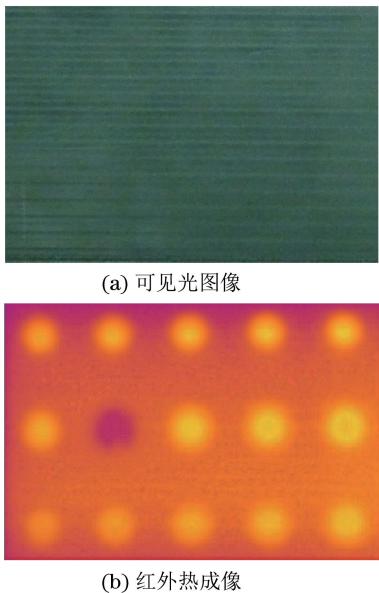


图 5 复合材料人工试件检测结果

图 6 为铝合金人工试件的检测结果,铝板厚 20 mm,背面分别加工有 3 行平底孔,每排孔的直径从上到下分别为 10,15,20 mm,每行孔的底部到上表面的距离从左到右分别为 1,2,3,4 mm,试件表面涂黑。采用了闪光灯热激励红外无损检测设备对

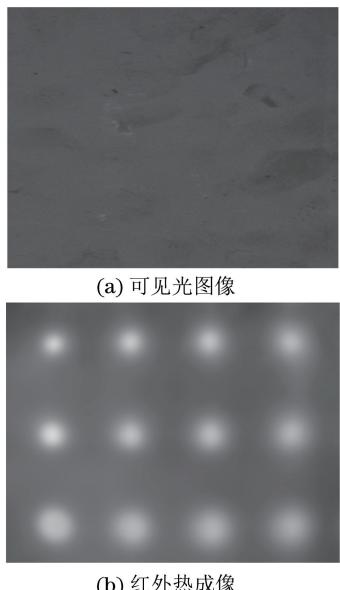


图 6 铝合金人工试件检测结果

此试件进行检测,从图中可以看到所有孔都清晰可辨。实验时图像采集了 10 s,图像显示的为 0.8 s 时刻的一阶微分图。

图 7 为一个背面开放的不锈钢钎焊蜂窝结构试件,表面不锈钢板厚 1.2 mm,蜂窝壁厚 0.2 mm,蜂窝边长 5 mm。采用便携式闪光灯热激励红外设备对其进行检测,图像显示热波成像技术可以较好地反映焊接情况。经仔细观察后发现,红外图像中蜂窝壁的颜色深浅变化是由钎焊材料的多少所引起的。

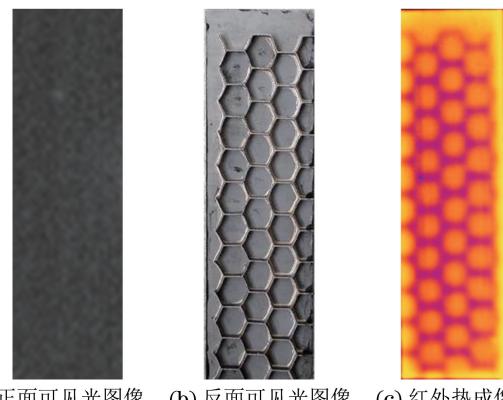


图 7 不锈钢钎焊蜂窝结构试件检测结果

图 8 为碳纤维复合材料蜂窝结构试件的检测结果,表面碳纤维板的厚度约 1.5 mm,蜂窝为聚酯纸质结构。采用该便携式设备检测,可以看出试件内部的结构,蜂窝形状清晰,其中上部一道深色横条为支撑结构,而左下方的一个深色点为人为注水产生。

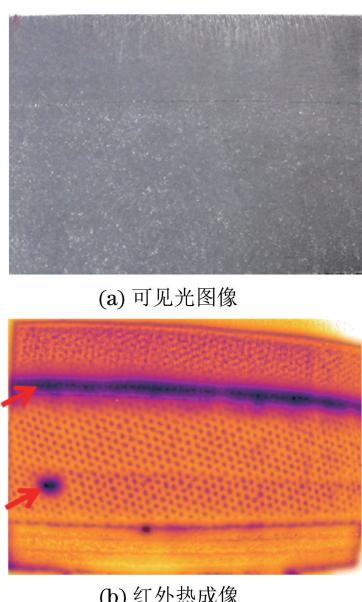


图 8 碳纤维复合材料蜂窝结构试件检测结果

(下转第 64 页)

相比较,二者的晶粒度等级基本相同,但其金相组织中珠光体、铁素体的分布状态不同,前者可以视为在晶粒边界形成了一种多重连续区域,该区域晶界由相互非等效、非平整的表面构成。以超声波穿过珠光体比较集中的区域时的声衰减为例,虽然金相显示珠光体单个晶粒已被分割开,但是把晶粒边界看做是由一定厚度的铁素体中包含着一个大的珠光体晶粒基体的界面更为恰当。也就是说,这种情况下,可以把多晶体看做一个整体,用晶胞大小代替晶粒大小更为适宜,这种微观结构会引起比单个大晶粒更加显著的超声波散射衰减。同理,珠光体、铁素体群的区域性分布以及类似于针状形貌的铁素体也会相对增大超声波的散射衰减。

为了进一步分析热处理工艺相同的条件下产生金相组织差异的原因,笔者对所采用钢坯的化学成分进行了统计分析。大量的统计数据对比显示,对于上述出现透声不良的 LZ50 钢车轴所采用的钢坯,其 Cr 的质量分数为  $0.20\% \sim 0.25\%$ , O 的质量分数约为  $15 \times 10^{-6}$ ,而通常所用的 LZ50 钢中的 Cr 的质量分数仅为  $0.02\% \sim 0.07\%$ ,O 的质量分数一般不超过  $10 \times 10^{-6}$ ;上述出现透声不良的 C35e 钢车轴所采用的钢坯,其 N 的质量分数约为  $40 \times 10^{-6}$ ,而其他同批生产的合格车轴钢中的 N 的质量

(上接第 60 页)

### 3 结语

介绍了自主研制的闪光灯热激励红外无损检测系统,该系统采用自主研发的高能量闪光灯热激励装置,具有多种闪光能量与脉冲周期控制单元,可搭配各种制冷、非制冷热像仪,采用独特的数据处理算法,使缺陷清晰显示。根据应用需求,系统可以设计为适合于生产线及实验室的台式设备,以及适合于现场原位检测的便携式设备。最后,通过闪光灯热激励红外无损检测系统对复合材料、铝合金、不锈钢蜂窝、碳纤维蜂窝试件进行了检测,取得了较好的检测结果。

### 参考文献:

- 王迅,金万平,张存林,等.红外热波无损检测技术及其进展[J].无损检测,2004,26(10):497-501.
- 刘颖韬,郭广平,杨党纲.脉冲相位法用于复合材料层

分数为  $50 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$ 。可见,钢坯化学成分改变时,必须相应调整热处理工艺方法和工艺参数,使车轴热处理后获得均匀的晶粒组织,才能保证车轴透声性能合格。

### 5 结论

金相组织中的珠光体聚集或珠光体、铁素体群的区域性分布,以及类似于针状形貌的铁素体都会使超声波的散射衰减增大,而且这种组织形态比局部有单个大晶粒对超声波声能衰减的作用更大。因此,应结合钢坯化学成分中的合金元素含量、氮含量等制定适宜的热处理工艺参数,以预防、消除或削弱这种组织状态的存在。同时,应严格控制钢的冶炼、钢坯轧制加热温度、时间以及轴坯的加热和锻造温度,避免出现影响车轴综合性能,以及后续热处理很难甚至无法消除的针状铁素体组织。

### 参考文献:

- 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2002.
- KOPEC B,王兴贤.利用超声波衰减研究铁路车轴的异常组织[J].国外机车车辆工艺,1985(6):33-36.
- 析检测的研究[J].激光与红外,2009,39(14):390-392.
- 郭兴旺,许文浩.蜂窝结构积水的脉冲红外热像无损检测的传热分析[J].红外技术,2011, 33(5):275-280.
- 张雨,王玉国,龚俊杰.列车门覆板-铝蜂窝脱粘缺陷的红外热像检测[J].激光与红外,2013,43(2):176-179.
- 李晓丽,曾智,张存林,等.红外热波无损检测技术用于风电叶片粘接质量的检测[C]//无损检测高等教育发展论坛暨电磁超声无损检测技术交流会.[S.1.]:[s.n], 2011.
- 刘颖韬,郭广平,温磊,等.红外热像检测技术应用于蜂窝结构复合材料的检测能力评价[J].无损检测,2011, 33(12):81-84.
- 张南南,郭兴旺.固体火箭发动机绝热层脱粘的红外无损检测建模方法[J].无损检测,2016,38(8):1-5.
- SHEPARD S M. Advances in pulsed thermography [C]// Proceedings of SPIE.[S.1.]:[s.n], 2001.
- 江海军,陈力,张淑仪.激光扫描红外热波成像技术在无损检测中的应用[J].无损检测,2014,36(12):20-22.