

脉冲红外热成像无损检测的物理检测机理

薛书文, 雷雨, 陈习权, 祖小涛

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】介绍了实验中采用的脉冲红外热成像无损检测系统的组成,通过黑体辐射理论和热传导理论研究了系统检测机理以及常用的反射和透射检测方法,提出了两种增强小发射系数试件热辐射的方法,并得到了反射法和透射法检测的适用范围。

关键词 脉冲; 红外热成像; 无损检测; 反射法; 透射法

中图分类号 TN21 文献标识码 A

Physical Basis and Detecting Principles of Thermal Pulse Video Thermography Nondestructive Testing

XUE Shu-wen, LEI Yu, CHEN Xi-quan, ZU Xiao-tao

(School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The experimental setup of the pulse video thermography nondestructive testing system is introduced in this paper. On the basis of study of testing mechanism and the two conventional methods, namely reflecting method and transmission method, two methods to increase the heat emission for specimen with smaller heat emission coefficient are presented. The application ranges for the two conventional testing methods are also presented.

Key words pulse; thermography; nondestructive testing; reflecting method; transmission method

脉冲红外热成像无损检测技术是上世纪末发展起来的一门新兴无损检测技术^[1~6],国内对此技术也开展了应用研究^[7~9],该技术是基于热传导理论和热辐射的普朗克定律提出的。热脉冲作用于试件表面之后,表面吸收热能并向试件内传导,当试件内存在缺陷时,由于缺陷部位与试件材料的热特性不同而引起试件表面温度场的分布异常,通过检测系统红外摄像仪对温度分布异常的识别以达到检测缺陷的目的。脉冲红外热成像无损检测系统主要包括三大部分:脉冲加热源、红外热成像系统和专用探伤软件,该系统方框图如图1所示。

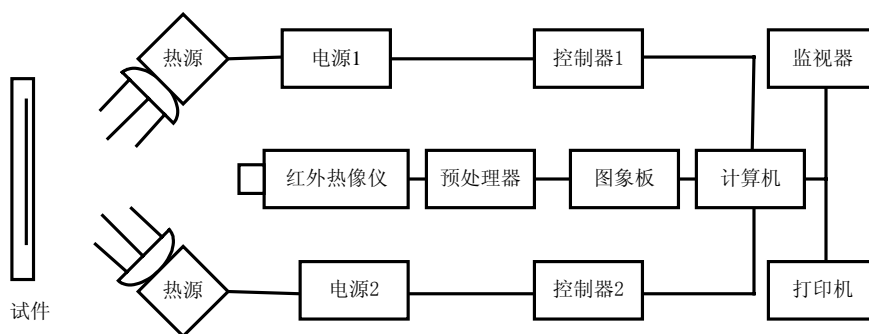


图1 脉冲红外热成像无损检测系统方框图

收稿日期: 2004-09-14

基金项目: 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金资助项目(10376006)

作者简介: 薛书文(1970-),男,博士生,现工作单位为湛江师范学院物理系,主要从事激光与红外检测技术方面的研究。

实验中采用脉冲加热源为双路脉冲氙灯, 脉冲宽度小于0.5 ms, 峰值功率约 10^6 W。红外热像仪温度分辨率0.1 , 空间分辨率1.2 mrad, 工作波段8~12 μm (HgCdTe探测器), 图像采集速度25帧/s(256×256像素)。

1 检测的热传导基础

依靠构成物质的粒子从物体较热的区域向较冷的区域提供的能量称为热。热传导的能量交换发生在固体或静止流体内, 依靠物体内部温度梯度从高温区域向低温区域传输能量。尽管热流不能被直接测量, 但它与可测量的温度标量联系在一起, 因此, 如果物体内部的温度分布 $T(r,t)$ 一经确定, 根据联系热流与温度的定律就不难求物体内的热流。把热流与温度联系起来的基本定律是傅里叶定律:

$$q(r,t) = -k\nabla T(r,t) \quad (1)$$

式中 $q(r,t)$ 表示单位等温面上在温度降低方向上单位时间的热流量, k 为材料的导热系数, $\nabla T(r,t)$ 为温度梯度。在给定温度梯度的条件下, 热流的大小正比于材料的导热系数。因此, 在热传导分析中, 材料的导热系数是一个很重要的参数, 它直接影响物体内部热流的大小。各种工程材料的导热系数相差悬殊, 最大的是纯金属, 最小的是气体和蒸汽, 非结晶绝缘体和无机液体的导热系数介于两者之间。

傅里叶定律揭示了热流量与温度梯度之间的关系, 对于稳态场和非稳态场都实用。通常用热传导微分方程来描述温度场时空领域的内在联系^[10]:

$$\nabla^2 T(r,t) + \frac{q_v}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中 $\alpha = k/\rho c$, 称为热扩散系数; q_v 表示热源项。利用此方程再结合边界条件可以分析脉冲红外热成像无损检测的三维理论模型。

2 热辐射理论基础

高于绝对温度零度的任何物体都会不停地向外界发射电磁波, 脉冲红外热成像正是利用物体发射的红外波段对物体内部的缺陷进行检测。红外光和其他电磁波一样, 具有反射、折射、干涉和吸收等性质, 它在介质中传播时会产生衰减, 这是由于介质的吸收和散射作用所致。大气对不同波长红外辐射的衰减是不同的, 对有些波段衰减很厉害, 而另一些波段衰减很小, 一般称为大气窗口, 脉冲红外热成像无损检测系统的热像仪正是利用某些大气窗口来接受来自被检测试件的红外辐射。根据物体辐射的特点可以将物体分为绝对黑体和灰体两类, 绝对黑体的辐射一般是不存在的, 被检测试件辐射都属于灰体辐射。灰体辐射总辐射强度等于同一温度黑体的总辐射强度乘以灰体的发射系数, 即灰体辐射满足斯蒂芬——波尔兹曼定律:

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \quad (3)$$

式中 ε 为灰体的发射系数, σ 为斯蒂芬——波尔兹曼常数, W 、 T 分别为物体的辐射强度和绝对温度。脉冲红外热成像无损检测技术正是利用这个公式, 通过热像仪接收来自物体的辐射, 从而测定物体表面的温度场分布, 然后根据温度场的异常分布情况来识别物体内部是否存在缺陷。

各种材料的发射系数是不同的。一般来说, 金属的发射系数较低, 而非金属的发射系数较高, 发射系数的高低对脉冲红外热成像无损检测的分辨力影响比较大。对于发射系数低的材料可以通过增加脉冲热能得到补偿, 但补偿是有限的, 否则脉冲热能过强可能会损坏被检测试件, 从而失去无损检测的意义。另外, 也可以采用在发射系数低的试件表面涂发射系数高的涂层的办法来增强热辐射, 对表面性能稳定的试件, 这是一种比较好的办法, 但对表面性能不稳定的试件, 这种方法可能会对检测试件表面造成污染或损坏。

3 检测原理

脉冲红外热成像无损检测技术是建立在电磁辐射和热传导理论基础上一门无损探伤技术。由电磁辐射理论知道, 只要物体温度在绝对零度以上, 它就会向外界发出辐射, 同时也会吸收来自外界的辐射, 一般情况下, 这种辐射与吸收处于平衡状态。脉冲红外热成像无损检测利用脉冲热源施加的热能打破被检测试件所处的热平衡状态, 在被检测试件内部造成热传导过程。当试件内部有缺陷存在时, 由于缺陷部位的

热传导特性与无缺陷部位的热传导特性不同,这种差异将造成试件中有缺陷和无缺陷部分所对应的表面温度分布的差异,从而各各部位的辐射强度也就不同。利用快速红外热像仪监测试件表面的温度场分布,根据异常状况可以判断缺陷是否存在。

脉冲红外热成像无损检测技术检测能力和分辨力主要取决于试件中有缺陷和无缺陷部分各自对应表面温度差值的大小。理论和实验结果表明,表面温度差与脉冲热源施加的热脉冲的能量密度成正比关系^[7]。因此,在检测中适当提高脉冲加热源的峰值功率,在一定程度上可以提高系统的探伤能力。这也是脉冲红外热成像无损检测与一般红外检测的重要区别。

实际检测中,根据热脉冲作用的方式,脉冲红外热成像无损检测对试件的检测分为两种方法:反射法和透射法。在反射法检测中,脉冲加热源与红外热像仪处于被检测试件的同一侧,而在透射法检测中,脉冲加热源和红外热像仪分居试件的两侧。这两种方法的热能传播过程如图2、3所示。

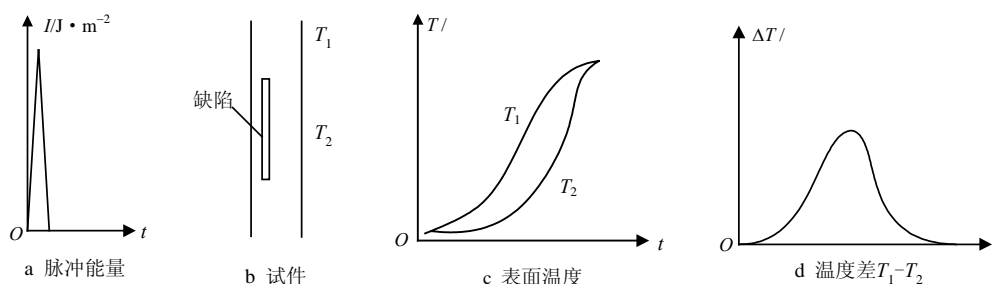


图2 反射法热能传播示意图

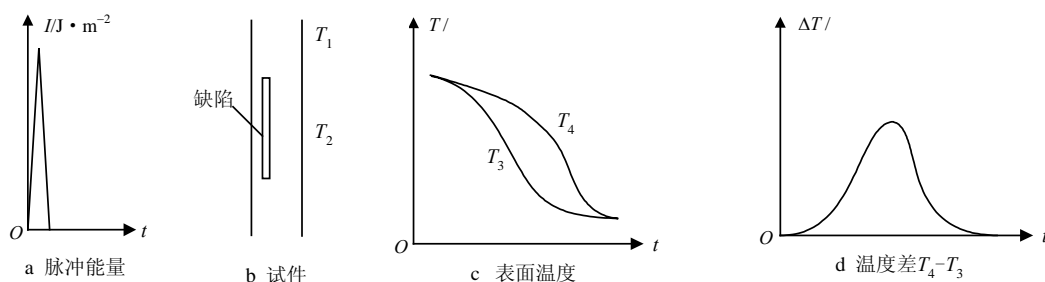


图3 透射法热能传播示意图

由于在反射法和透射法这两种检测方式中热脉冲的作用方式不同,所以它们有不同的应用范围。对于反射法来说,由于热脉冲直接作用于试件表面,所以要求试件表面的耐热性能要好一些,否则在检测中可能造成试件表面的损伤。在检测实验中,热脉冲作用于试件表面后的瞬间温度一般在100 左右,如果提高热脉冲的峰值功率,瞬间温度会更高,在对纸质蜂窝材料检测实验中利用反射法就曾出现表面烧伤的现象。所以,反射法一般应用于表面耐热性能较好的试件,比如一般的金属材料试件。如果材料表面的耐热性能不好,为不直接损伤材料的表面,一般可以采用透射法。但是,利用透射法的前提条件是被检测试件的厚度不能太大,否则无法检测到缺陷。

4 结束语

红外热成像无损检测虽有成功的应用,但也存在一些亟待解决的问题,如缺陷的定量化分析、红外热图象的处理和缺陷的识别以及检测分辨力等。这些问题当中最棘手的是检测分辨力,利用上面介绍的单脉冲加热红外热成像技术,实验中能探测的缺陷深度比较小,一般在3~4 mm左右^[7,8]。目前国外有人使用多脉冲加热技术进行红外热成像无损探伤^[5],对于铜试件和石墨试件,探测深度可分别达到5 mm和7 mm。

(下转第327页)

4 结 论

针对面临的信号环境所具有的高密度, 占空比大, 脉冲重叠丢失率高的特点, 本文构建了一个实时的信号预分选系统框架, 改进了基于概率统计的分选算法, 结果显示算法分选正确率达到了96%以上, 大大减轻了后续信号处理的压力。同时, 本文提出的方法, 计算简单, 物理意义明确, 这对于实时性要求高的场合是有利的。通过硬件实现验证, 本系统对信号的预分选处理, 有较大余量的满足了实时性的要求, 因此具有广泛的工程应用意义。

参 考 文 献

- [1] Mardia H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proc F, Commun. Radar&Signal Process., 1989, 136(4): 149-154
- [2] 赵国庆. 雷达侦察信号的预处理[J]. 电子对抗, 1996, 1: 23-33
- [3] 赵建仁, 龙德浩, 熊平. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77-82
- [4] 祝正威. 脉冲丢失概率的计算方法[J]. 电子对抗技术, 1990, 12: 21-26
- [5] Hanna C A. The Associative comparator: adds new capabilities to ESM signal processing [J]. Defense Electronics, 1984, (2): 51-54

编辑 徐安玉

(上接第322页)

参 考 文 献

- [1] Balageas D L, Krapez J C. Pulsed photothermal modeling of layered materials[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(2): 348-357
- [2] Reynolds W N. Inspection of laminates and adhesive bonds by pulsed-video thermography[J]. NDT international, 1990,21(4): 153-158
- [3] Hobbs C, Temple A. The inspection of aerospace structures using transient thermography[J]. British J. of NDT,1993, 35: 183-189
- [4] Lau S K, Almond D P. A quantitative analysis of pulsed video thermography[J]. NDT & E international, 1991, 24: 195-202
- [5] Takahide S, Shiro K. Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations[J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 211-218
- [6] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in pulsed phase video thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 175-181
- [7] 薛书文, 宗明成. 尼龙材料内部缺陷的红外热成像无损检测[J]. 红外技术, 1997, 19(5): 40-44
- [8] 薛书文, 宗明成, 丁铁英, 等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表缺陷[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(6): 424-428
- [9] 梅林, 陈自强, 王裕文, 等. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 66-70
- [10] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998

编辑 孙晓丹