

新兴的无损检测技术 ——红外热波成像检测

鲍 凯, 王俊涛, 吴东流

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘 要: 针对红外热波成像检测技术, 重点介绍了其理论基础、检测原理、红外探测器、各种不同的主流检测方法及其检测机理和优缺点。综述了国内外红外热波成像检测进展及所取得的最新应用成果, 最后给出其技术特点, 指出了该技术发展存在的问题和发展方向。

关键词: 热波; 红外成像; 缺陷; 探测器

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)08-0393-05

New Nondestructive Testing Technology: Infrared Thermography Testing

BAO Kai, WANG Jun-tao, WU Dong-liu

(China Aero-Polytechnic Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract: For the infrared thermography testing, the theory, principle, infrared detector, various testing methods and mechanism based on it, and advantages and disadvantages of it are presented. The development situation and the recent successful application at home and abroad are summarized. The characteristics of the technology, the existed problems and the development trend of the technology are indicated in the end.

Keywords: Thermal wave; Infrared thermography; Defects; Detector

红外无损检测主要是根据被探测物体的温度场来确定缺陷的存在和形状, 因此, 其在数学上是求解与导热问题有关的微分方程的几何反问题, 即根据红外信号重建缺陷信息。反问题求解的输入为材料参数、加热参数、温度空间分布以及温度随时间的变化; 输出为缺陷横向尺寸、缺陷厚度和深度。

红外无损检测按照检测方式可以分为主动式和被动式两大类。主动式检测是利用外部热源作为激励源对工件加热, 利用红外热像仪获得不同时刻工件表面的温度分布, 以检测材料的内部是否存在缺陷; 被动式检测则是利用工件自身的温度分布来检测工件内部的缺陷, 多用于运行中的设备和电子元器件的检测。

通常所指的红外热波成像检测是指主动式红外无损检测, 也是红外无损检测工程应用中, 应用最

多、最广泛的方法。

1 红外热波成像检测的理论基础及原理

红外热波成像检测技术是建立在电磁辐射和热传导理论基础上的—门无损探伤技术。由热辐射普朗克定律导出斯蒂芬-波尔兹曼定律, 即

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中 ϵ ——灰体的发射系数

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数

W, T ——物体的辐射强度和绝对温度

因此, 物体具有不同的温度和发射系数, 热像仪接收来自物体的辐射, 便可测定物体表面的温度场分布。

而热传导理论最根本的任务就是确定物体内的温度分布。把热流与温度联系起来的是傅里叶定律, 即

$$q(r, z) = -k \nabla T(r, z) \quad (2)$$

式中 $q(r, z)$ ——单位面积上在温度降低方向上单位时间的热流量

收稿日期: 2005-12-16

作者简介: 鲍 凯 (1977~), 男, 工程师, 主要从事射线、工业 CT、泄漏、红外和声发射检测的科研工作以及无损检测人员资格论证工作。

k ——材料的导热系数

$T(r, t)$ ——物体内部温度时空分布

$\nabla T(r, t)$ ——温度梯度

它揭示了热流量与温度梯度之间的关系。通常用热传导微分方程来描述温度场时空域的内在联系

$$\nabla^2 T(r, t) + \frac{q_v}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad (3)$$

式中 q_v ——热源项

α ——热扩散系数

$\alpha = k/\rho c$

ρ ——材料密度

c ——材料比热容

由电磁辐射理论可知,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。红外热波成像检测针对被检物材质、结构和缺陷类型及检测条件,利用周期、脉冲和阶梯等变化性热源施加的热能打破被检测试件的热平衡状态,在被检测试件内部造成热传导,不同媒介材料表面及表面下的物理特性和边界条件将影响热波的传输,并以某种方式在媒介材料表面的温度场变化上反映出来,采用红外成像对时序辐射信号进行捕捉和数据采集,应用软件技术实现对实时图像信号的处理和分析,可获取材料的均匀性信息和表面及其以下的结构信息,从而达到检测和探伤的目的。

2 红外探测器的发展概况

红外热波成像检测离不开先进红外热摄像仪器设备的支持,以对红外信息进行探测、识别和分析并加以控制。红外探测器将不可见的红外辐射转换成可测量的信号,是红外热摄像仪器的关键性部件,直接影响红外热波成像检测的灵敏度。

随着军事和商业需求的不断提高,微电子技术和微机电系统技术(MEMS)等进步的不断推动,红外探测器技术获得了长足快速的发展。从20世纪30年代单一的PbS器件发展到现在的多个品种,包括InSb, HgCdTe, PtSi, InGaAs, GaAlAs, 非本征硅等量子探测器, VO_x, PZT, BST, 多晶硅和非晶硅等热探测器。60年代以前红外探测器多为扫描成像单元探测器,灵敏度低,二维扫描系统结构复杂、笨重,大规模凝视焦平面阵列探测器的出现,增加了探测单元数,不再需要光机扫描机构,大大简化了探测器整机系统,其阵列集成规模已高达2 048×2 048,并向4 096×4 096迈进,像元尺寸达到了十几微米

甚至几微米。探测器从制冷型向非制冷型发展,工作温度从极低温发展到了目前的77K或室温。探测器噪声等效温度差(NETD)可达到0.02K,灵敏度向0.002K的方向努力。现代探测器技术已进入第二和第三代,其重要标志之一就是探测单元数大大增加。另一方面是开发同时覆盖两个波段以上的双色和多光谱探测器。表1是根据对致冷条件和工作波长要求对红外焦平面阵列探测器进行的分类。

表1 红外焦平面阵列探测器的分类

工作状态	短波红外探测器 (1~3 μm)	中波红外探测器 (3~5 μm)	长波红外探测器 (8~14 μm)
致冷	HgCdTe	InSb, PtSi, HgCdTe	GaAlAs/GaAs, HgCdTe
非致冷	InGaAs	InGaAs	VO _x , BST, -Si

未来红外探测器技术还将向更大规模阵列集成、更小探测器单元尺寸、双色或多色阵列以及非制冷阵列的方向发展。为获得更高集成密度的焦平面阵列传感器,同时大幅度地提高阵列性能,减小生产成本,新颖的器件结构和材料将会不断被采用。

3 红外热波成像检测方法

按不同热加载方式和热波信号采集处理方式,红外热波成像检测主要可以分为以下几种方法。

3.1 脉冲红外热波成像检测法

脉冲红外热波成像检测激励方式采用闪光灯、热水和激光束等,大功率闪光灯是研究最多、最成熟的热脉冲加载方法。

对热传导微分方程进行一维近似处理。设试件是厚的大平板,试件内距表面 l 处有一空气(隔热)层缺陷。脉冲热波可看作 $\delta(t)$ 函数,试件表面单位面积吸收热能为 I_0 。脉冲热波在试件内的传导过程可由一维傅里叶传导方程描述

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

式中 T 为试件表面下 x 处 t 时刻的温度。设试件在脉冲热波作用前初始温度分布为零,并把平板试件看作热无限厚物体,求解式(4),并考虑热脉冲作用后无缺陷试件表面温度随时间的变化,及当热波传播到工件内部缺陷处时,将受到阻碍并向回反射传播,缺陷部分所对应的表面温度随时间的变化,可得试件在 t 时刻有缺陷和无缺陷区域各自对应表面的温度差为

$$\Delta T(0, t) = \frac{2I_0}{(\pi \rho c k t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{l^2}{\alpha t}\right) \quad (5)$$

因此,对试件进行脉冲加热后,只需用红外热像仪对时序温度信号进行捕捉和数据采集,并进行分析,便可判断工件中有无缺陷。

表面温度差 ΔT 随时间 t 变化的曲线有一峰值,将式(5)对时间求导,并令导数为零,可得温度差峰值对应时间为

$$t_{\max} = \frac{2l^2}{\alpha} \quad (6)$$

这一时间在红外热波成像中具有重要意义,根据测量到的这一时间值,就可获得缺陷离表面的距离 l 。

脉冲热波成像检测方法虽然简单,但存在以下无法克服的缺点,① 可检测的构件厚度有限。当热量穿过较厚的构件时温度场趋于均匀,难以显示出缺陷。② 对热源的均匀性要求很高。由于热像仪的灵敏度一般优于 0.1°C ,所以保持良好的均匀性是很困难的。③ 适合检测平板构件,不适于复杂形状的构件^[1]。

3.2 调制红外热波成像检测法

调制红外热波成像检测法即通常所说的锁相(LOCK-IN)热像检测技术,该方法使用强度按正弦规律变化的热辐射源进行加热激励,在加热周期的特定时刻采集多幅热像,计算物体表面各点温度变化的幅值图和相位图,由图判断缺陷的存在和特征,此法以改善红外热波检测噪声干扰和灵敏度差为初衷,弥补脉冲红外热波成像检测的不足。

试件被施加正弦温度激励,试件温度响应也描述为正弦形式。当光束有某一频率的调制时,热量的吸收和产生的温度变化也被调制。这种温度调制主要由传导介质内热传导的具体条件和介质的光吸收特性来决定。由于热源被调制,用波动理论来分析热波现象,如果热源的角频率是 ω ,则

$$T(x, t) = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right) \quad (7)$$

式中 μ ——热扩散长度

$$\mu = \sqrt{2\alpha/\omega}$$

λ ——热波波长

$$\lambda = 2\pi\mu$$

周期热波的传播速度 v 能用波长和频率计算

$$v = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (8)$$

高频热波传播速度快,但热扩散长度短、衰减快;而低频热波穿透深,但很慢。热波与普通的波动

传导不同的是热波衰减很快。热扩散长度是一个关键参数,它提供了一个标准,即在什么深度范围内热波理论是有效的。

事实上,每个周期只需要几个数据点,考虑到参考函数和输出信号是正弦形式,可以计算振幅和相位偏移。振幅图像与局部光和表面红外特征成比例。相位的图像与传播延时相关,与局部光和表面红外特征无关。

调制红外热波成像检测法的难点是在工业现场难以得到可控的调制热源,并且获取过程慢,每次只测试一个频率。但其检测的稳定性和重复性好,测量得到试件温度幅值和相位信息丰富,对加热功率要求低,测量深度可调,而且可以解决加热不均匀和表面发射率不一致的影响,显著提高红外热波检测信噪比和灵敏度,具有巨大的工程应用潜力。

图1为法国 CEDIP 公司进行的铝蜂窝锁相红外热波成像检测的幅值图和相位图,相位信息图中不同深度和大小的缺陷清晰可见,蜂窝结构网格也十分清楚。

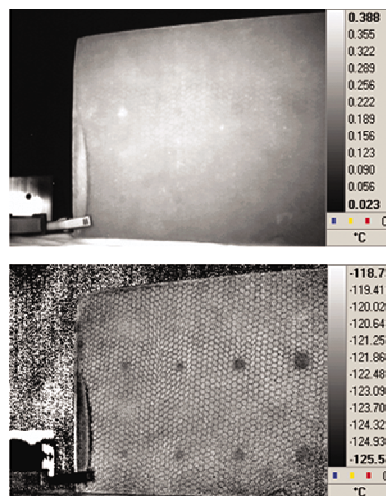
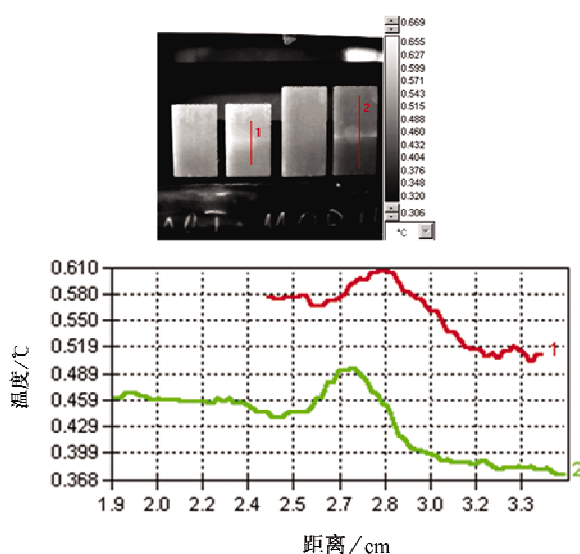


图1 锁相红外热波成像检测的幅值图和相位图

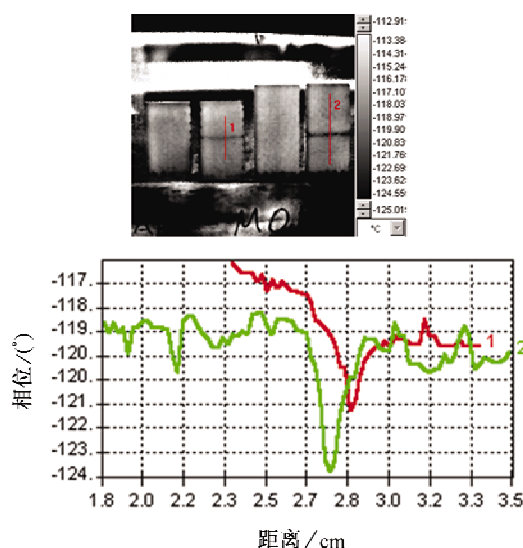
图2为该公司对另一组试件进行锁相红外热波成像检测得到的幅值图和相位图及测量信息,可以看出相位图中的相位信息对缺陷深度有时比幅值信息更敏感,相位信息与缺陷深度具有相应的对应关系,2号缺陷比1号缺陷深。

3.3 脉冲相位红外热波成像检测法

调制红外热波成像可以说是单一频率测试,而脉冲红外热波成像是所有的频率同时测试。在脉冲红外热波成像中,若使用矩形脉冲而不是理想的 δ 脉冲,发射到试件内部的频率成分就不具有恒幅。



(a) 试件幅值图及测量线上的幅值信息



(b) 试件相位图及测量线上的相位信息

图 2 锁相红外热波成像检测的幅值图和相位图及测量信息

矩形脉冲宽度为 τ , 振幅为 A , 中心在 $t=0$ 时刻, 频率域表达式为 $A\tau\sin(\pi\mu\tau)/\pi\mu\tau$, 这里 μ 是频率变量。为了综合脉冲热波成像和调制热波成像的优点, 作为二者有益补充, 基于脉冲相位分析的热波成像方法被提出。通过对脉冲红外热波成像的整个过程的温度记录, 逐点进行相位分析, 提取温度波动的相位信息, 以反映被检物的特征。

脉冲相位红外热波成像检测以傅里叶变换为基础, 温度的演变 $f(x)$ (x 为图像序列中的索引) 从图像序列中提取出来, 进行离散傅里叶变换, 即

$$F(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp\left(-j\frac{2\pi\mu x}{N}\right) = R(\mu) + jI(\mu) \quad (9)$$

$$\Phi(\mu) = \tan^{-1} \frac{I(\mu)}{R(\mu)} \quad (10)$$

由此得到不同频率下的相位图, 其中相位图中的最大值具有重要意义, 其具有调制红外热波成像检测法检测深度较深、对试件表面光分布不敏感和脉冲红外热波成像检测法检测速度快的优点, 脉冲相位红外热波成像检测法更适于现场检测, 因为它适于低或高的热传导系数的试件。

3.4 超声/微波红外热波成像检测法

此方法与上述方法的最大不同是采用超声波(或微波)作为被检件的激励源, 热波直接由试件内部产生。当试件激发超声振动时, 由于热弹效应和滞后效应, 缺陷或不均匀区域的弹性性质不同, 其引起的声衰减及其产生的热比无缺陷或均匀区域多, 使得该区域获得选择性的加热。此外, 试件中的热流量与试件热学性质有关, 通常缺陷区域比无缺陷区域的热流量小, 因此缺陷或非均匀区域的热扩散比相邻区域少, 所以, 缺陷或非均匀结构就可以通过试件的温度异常变化表现出来, 通过红外热像仪可以方便地进行摄取和分析。

声波机械振动衰减转换为热能并引起表面温度的升高的效应, 持续时间一般在毫秒量级, 在超声源激发开始的几毫秒到几十毫秒范围内现象最明显, 然后由于热扩散, 这种现象变得很模糊。但通过使用大功率的超声发生器和红外热像仪可以非常清楚地检测到这种温度的变化。此外, 固体中声衰减随着声波频率的增加单调递增, 典型地与频率的平方成正比。由此, 采用高频率超声能达到更高灵敏度的检测。通常, 超声红外热像检测发生器的功率为 200~900 W, 超声波脉冲频率为 20~100 kHz。

国外做了大量的研究, 国内南京大学在该方面也做了许多工作, 进行了疲劳裂纹和冲击损伤等的检测^[2]。超声激励, 由于其对缺陷和不均匀区域的选择性加热, 对无损伤区域无明显变化, 则可以显著提高红外检测灵敏度。此外, 超声波传播距离长, 不需要移动激发源位置, 适于大型及复杂结构件的检测, 检测速度快。这些特点使其成为红外检测最新技术领域, 受到广泛关注。通过大量的试验研究, 超声红外热像检测可以方便地检测金属、陶瓷和复合材料等的表面或浅表层的疲劳裂纹, 也同时可以检测材料由于冲击损伤导致的内部应力。

4 红外热波成像检测的应用实例

4.1 玻璃钢试件及固体火箭发动机绝热层脱粘红外热波检测^[3]

首都师范大学红外热波实验室对平底孔模拟缺陷玻璃钢试件进行了脉冲红外热波成像检测。从检测结果可以看出,不同深度的缺陷在材料表面所显示的温差和显现时间是完全不同的。通过对整个热过程的热波理论计算和图像处理将可得到试件的热层析图。采用脉冲红外热波检测固体燃料发动机筒外壳与壳内绝热层界面粘接状况,也能明显分出粘接良好和脱粘区域。

4.2 飞机检测^[4]

红外热波检测技术用于飞机探伤主要是探测其蒙皮损伤。飞机蒙皮损伤大致有冲击损伤、疲劳损伤、腐蚀损伤、其它结构损伤(如各种失效的粘接、焊接和铆接)以及蜂窝结构件和泡沫材料件的积水和积油等五类。

图3是某飞机蒙皮的脉冲红外热波检测结果拼图,图中可看清铝蒙皮内部的加强筋开裂和锈蚀损伤。全部检测仅用时20 min,这对于飞机在役检测十分有意义。对飞机蜂窝结构材料进行脉冲加热后,应用红外热波检测技术可绘出表面不同区域的冷却曲线,用于飞机蜂窝结构材料的检测与损伤特性识别。图4用不同彩色对照显示了不同损伤区域与其相应的表面冷却曲线,其结果可以识别出不同

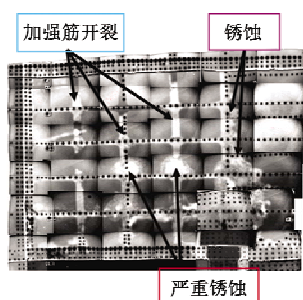


图3 某飞机蒙皮的红外热波检测结果拼图

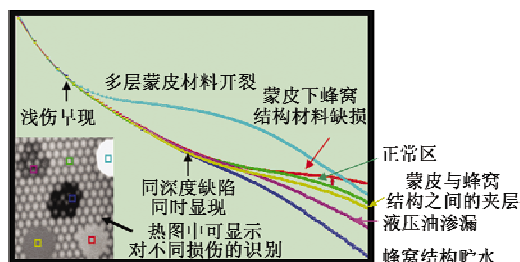


图4 用于飞机蜂窝结构材料表面下损伤识别和表征

损伤情况。

4.3 碳纤维增强多层复合材料受单点撞击后的层析探伤^[4]

被检复合材料厚度约4 mm,共32层。受单点撞击后表面无明显可见损伤。脉冲加热后,如图5所示,不同时间的热图显现了不同深度层的损伤状况。各层损伤沿该层纤维方向扩展。

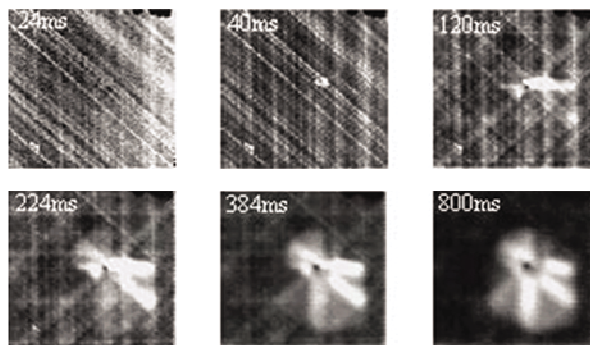


图5 碳纤维增强多层复合材料受单点撞击后不同时间的热图

4.4 裂纹检测^[4]

裂纹的检测一直是无损检测界的难题,而利用前面所述的超声红外热波检测技术的优势,却可以得到令人满意的结果。图6是采用超声激励红外热波检测铝试件中裂纹的热图序列,从中可以清楚看出裂纹的大小、形状和取向等。

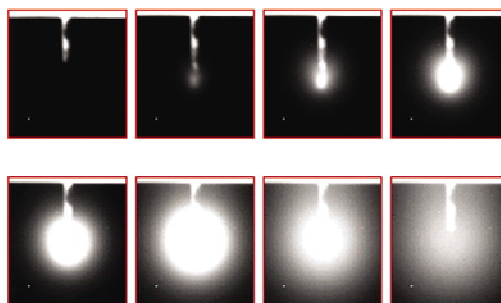


图6 铝试件裂纹检测超声加热后热图序列

4.5 腐蚀检测与测量

采用锁相红外热波成像检测腐蚀,如图7(法国CEDIP公司资料)所示,在幅值图和相位图上均可见腐蚀的发生,但从两个图像所反映的数据来看,相位所反映的信息更多更灵敏,使厚度和尺寸的测量更精确。

5 结束语

红外热波成像检测具有适用面广、检测速度快、

第 17 届世界无损检测大会征稿通知

第 17 届世界无损检测大会技术委员会热忱欢迎全世界无损检测人员踊跃投稿。作者可要求稿件在大会发言、分组会交流或选择张贴。大会语言为英语。

摘要截止日期为 2007 年 10 月 31 日,2007 年 12 月 31 日前发录用通知。

全文截止日期为 2008 年 2 月 29 日,2008 年 4 月 30 日前发录用通知。

相关信息

* 整篇摘要的字数(包括作者姓名、单位、城市和国家)不得多于 300 字。

* 作者可通过网站 www.17wcndt.com 或电子信箱 chsndt@public2.sta.net.cn 或 chsndt2008@163.com 投寄一篇以上的用英语书写的摘要,摘要录用后再投寄全文(英文),传真件一律不接受。

* 作者在投寄摘要时必须在网上填写一份登记表,注明稿件所属专业和选择口头交流还是张贴,并与摘要同时通过网站投寄。

* 大会技术委员会在 2007 年 12 月 31 日前发出摘要录用通知。

* 收到摘要录用通知后,作者必须在 2008 年 2 月 29 日前通过本网站注册参加大会,否则被视为不参加会议,论文将不收入大会论文集。

* 不得投寄以前发表过的摘要和文章。

* 与会代表将得到一本摘要集和一张收录大会全部论文的光盘。

摘要格式

摘要题目用英文大写。

第一作者,第二作者依次排列。单位,城市,国家。

摘要内容。

举例

PREPARING TESTING
BY PROVIDING CRITICAL SYSTEMS

D. Rouillard, P. Casteran, P. Felix, R. Castanet; Bordeaux; France

The objective of this study was...

世界 NDT 了解中国

中国 NDT 走向世界



十七届世界无损检测会议

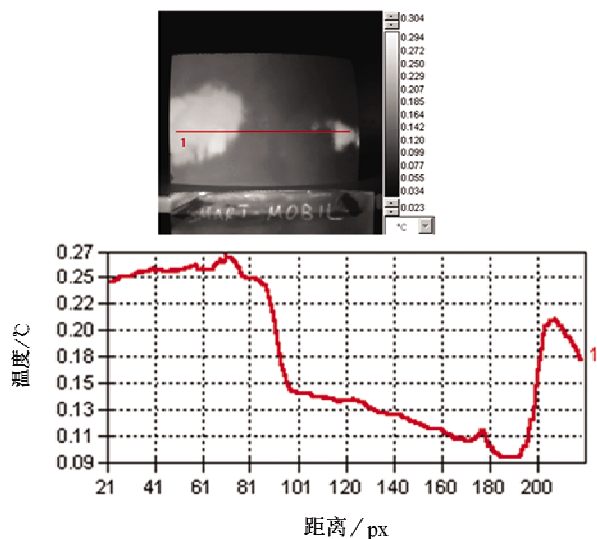
2008年8月26-31日在上海召开

主办单位: 国际无损检测委员会

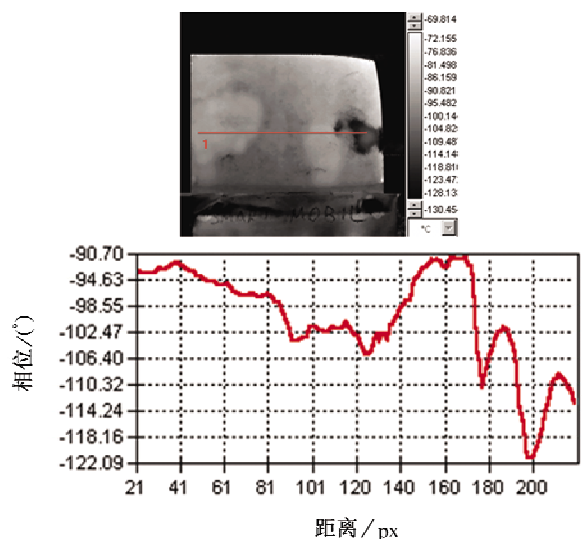
承办单位: 中国机械工程学会无损检测分会

协办单位: 上海克洛力有限公司

热烈欢迎全世界NDT相聚上海
无损检测学会期待您的到来



(a) 幅值图及测量线上的幅值信息



(b) 相位图及测量线上的相位信息

图 7 锁相红外热波成像腐蚀检测的幅值图和相位图及测量信息

酞酒精溶液点滴呈非碱性反映,该灰色印痕并不是实质意义上氢氧化钙和二氧化碳反应生成的碳酸钙,只不过是混凝土表层被污染或酸、碱性物质中和形成的混凝土试块表层中性化现象,揭示了是试块上的脱模剂造成了混凝土表面的假性碳化值。

3 工程实例

某一工程混凝土设计强度等级 C30,采用回弹法检测混凝土强度。因有一部分设备基础构件不具备侧面水平检测的条件,所以在基础成型面上进行回弹检测,并按回弹检测规程进行测试角度与检测面的修正后计算回弹强度,对能进行侧面回弹的构件尽可能水平检测。结果发现成型面和侧面这两个面上的回弹测定强度存在显著差异。有代表性构件的回弹法测定强度结果见表 2。

表 2 部分构件检测结果

构件检测面	回弹值	碳化值/mm	回弹法测定强度/MPa
1 号成型面	27.8	0	32.4
2 号成型面	28.3	0	33.1
1 号侧面	32.7	2	26.8
2 号侧面	33.0	2	27.3

表 2 中构件检测面的一个区别是测试角度和检测面状况不同;另一个区别就是混凝土浇筑时成型面上无模板、侧面上架设有模板,两者的回弹差值约为 5,但成型面上混凝土的碳化深度为零,侧面上的碳化深度为 2 mm。同批混凝土同龄期在同一施工环境中成型养护,同一构件的成型面和侧面成直角

的两个面上竟有 2 mm 的碳化区别。经询问该工程使用的脱模剂是酸性脱模剂。同一构件在成型面上检测的回弹值经测试角度和检测面修正后与侧面的回弹值相当。因无碳化值,其回弹法测定混凝土强度 >30 MPa,可满足设计强度要求,但侧面上检测的回弹值经碳化值修正,却得到不满足设计强度要求的结论。

4 结论

(1) 采用废机油或酸性脱模剂成型的混凝土,其模板结合面的表层混凝土用酚酞酒精溶液测定到的碳化值,不一定是实质意义上氢氧化钙和二氧化碳反应生成的碳酸钙,该疑似碳化现象只不过是碱性混凝土受到酸性脱模剂侵蚀后的中性化反映。

(2) 现行无损检测规程把碳化深度作为一个参量用来克服某些混凝土回弹法测强的影响因素。当回弹值相当时,测量到的碳化深度值越大其对应的混凝土检测强度值越低,回弹法检测中存在因假碳化现象引起的混凝土检测强度评判的误区。

(3) 当在短龄期混凝土检测到大数据碳化值或对碳化值有怀疑时,可打磨掉混凝土疑似碳化层表层后进行回弹验证,但此时应避免裸露石子对回弹测值的影响,并及时询问工程中使用的混凝土脱模剂种类,避免假碳化值对混凝土回弹检测强度的误导。

参考文献:

- [1] JGJ/T 23—2001,回弹法检测混凝土抗压强度技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.

(上接第 398 页)

非接触、远距离、检测面积大及图像直观等优点。随着计算机和信息处理等技术的飞速发展,红外热波成像检测也发展迅速,具有广阔的应用前景。

红外热波成像检测存在的问题和发展趋势是,① 最根本的问题是缺陷的定量分析。② 红外检测分辨力的影响因素分析,以及如何提高分辨力等问题。③ 多样、方便、精确的热激励方式的研究。④ 红外信息处理技术的智能化发展,如结合人工神经网络和小波分析等的智能信息处理技术。⑤ 自动化检测系统、便携检测系统的发展。⑥ 缺陷的自动判别等。

参考文献:

- [1] 张建合,郭广平.国内外飞速发展的热像无损检测技术[J].无损探伤,2005,29(1):1—4.
- [2] 洪毅,缪鹏程,张仲宁,等.超声红外热像技术及其在无损检测中的应用[J].南京大学学报(自然科学),2003,39(4):547—552.
- [3] 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.
- [4] 王金峰.红外热波无损检测技术在美国的应用[J].无损探伤,2004,28(5):1—4.