文章编号：1002-2082(2008)SO-0044-05

被动式与主动式红外热成像技术研究

徐义广，刘 波，李艳红，张存林
（首都师范大学 物理系，北京 100037）

摘 要：从斯特藩-玻尔兹曼定律$W=\varepsilon\sigma T^4$出发，对被动式与主动式红外热成像技术进行了分析。被动红外成像是热像仪通过接收物体的红外辐射并把它转换为电信号反映在热图上，根据热图来提取目标特征信息的；主动式热激励红外成像技术是从热传导方程出发，其热波是随时间变化的温度场，研究的是周期、脉冲、阶梯等变化性热源与媒介材料及媒介几何结构之间的相互作用。与被动成像不同的是，主动成像通过加载如闪光灯、超声波、激光、THz波、热风、电流、机械振动等多种激励方式，使热像仪能够实时监测材料表面的温场变化，进而可获取材料的均匀性信息以及其表面下的结构信息，达到无损检测和探伤的目的。同时，就2种热成像技术的原理，比较了它们的应用。

关键词：红外热成像；被动式；主动式激励；无损检测
中图分类号：TN219 **文献标志码**：A

Technologies of passive and active infrared thermal imaging

XU Yi-guang, LIU Bo, LI Yan-hong, ZHANG Cun-lin
(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: The passive and active infrared thermal imaging technologies were analyzed based on the Stephen-Boltzmann law ($W=\varepsilon\sigma T^4$). The passive infrared imaging technology adopts a thermal camera to receive the infrared radiation of an object, and the active infrared imaging technology, based on the equation of heat exchange, researches the interaction of variation thermal sources with medium material and geometrical structure. The active infrared imaging technology obtains the information of material homogeneity and the structure under its surface to implement the non-destructive testing and inspection by monitoring the temperature variation of material surface through flashing light, ultrasonic wave, laser, THz wave, hot blast, electric current or mechanical vibration. The applications of both technologies are compared according to their principles.

Key words: infrared thermal imaging; passive mode; active mode; non-destructive testing

引言

红外技术涉及遥感、热传导、光学、超声、材料科学、机械设计、电路设计、计算机软件设计等多方面的理论知识，该项技术是一门跨学科、跨应用领域，可在多领域广泛应用的通用型实用技术，随着红外探测技术和先进电子技术的进步，红外技术在科学实验和现代工业中发挥着重要作用，其普遍的应用有远程感应、夜视、非接触测量和常规热像仪无损测试及近年发展的主动激励式红外热波无损检测技术。

收稿日期：2007-10-11； 修回日期：2007-12-26
作者简介：徐义广(1980—)，男，山东薛城人，硕士研究生，主要从事红外热成像无损检测技术研究工作。
E-mail：xuyiguang2008@126.com

1　2 种热成像技术的原理比较

1.1　被动式红外热成像

自然界任何高于绝对零度的物体都能产生红外辐射,由斯特藩-玻尔兹曼定律 $W=\varepsilon\sigma T^4$(σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;ε 为物体表面的发射率,是表征物体红外辐射能力的参数)可知,物体的辐射出射度与温度的 4 次方成正比,当温度有很小的变化时就会引起辐射功率的较大变化。因此,利用探测仪,通过测定目标和背景之间的红外线差就可以得到不同的红外图像,热红外线形成的图像称为热图。目标的热图反映的是目标表面温度的分布图像,红外热成像将人眼不能直接看到的目标表面温度分布变成人眼可以看到的代表目标表面温度分布的热图像(参见图 1),目标的特征信息在热图像上可以反映出来。

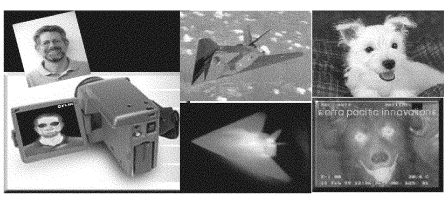


图 1　各目标的可见光图(上)及分别对应的热图(下)

Fig. 1　Visible light and infrared thermal pictures of objects

1.2　主动式热激励下的红外热成像

1.2.1　闪光灯/脉冲热加载成像

利用短时高能量脉冲(闪光灯可以是单个或者阵列)及需要检测的试件或物体(如图 2 所示),考察材料表面发生的温度变化,在计算机控制下,利用红外热像仪进行时序热波信号的探测和数据的采集,根据热传导理论就可以反求缺陷的定量化信息。

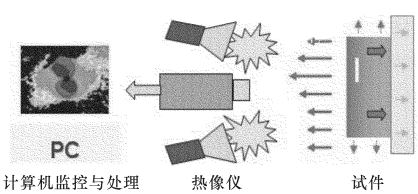


图 2　闪光灯脉冲激励示意图

Fig. 2　Scheme of flashlight pulse stimulation

1.2.2　超声激励红外成像

打开超声控制器,用超声枪抵住部件对其进行激励,部件内部有缺陷的区域受到激励后会吸收耦合的超声能量产生热量使其温度升高,从而影响整个试件表面的温场分布。利用红外热像仪监控材料表面温场并采集数据,用专用软件进行数据处理就可以得到材料中裂纹的位置特征信息。超声热激励的特点是:第一,超声波只对缺陷加热,这不同于加热到整个试件表面的闪光灯脉冲加热,从而得到的信噪比特别高;第二,它不需要考虑加热的均匀性问题,不必顾忌试件几何形状的复杂性;第三,对于大多数固体,声波(速度比较快)传到裂纹几乎是瞬时的。超声的热激励示意图见图 3 所示。

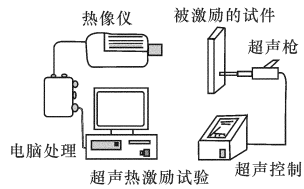


图 3　超声热激励示意图

Fig. 3　Scheme of ultrasonic wave stimulation

1.2.3　超声锁相激励红外成像

为了解决超声激励换能器频率单一的问题,利用超声锁相的主动激励方式可以使输出信号的频率具有可调节性,大大提高了检测试件的针对性。其原理如图 4 所示。

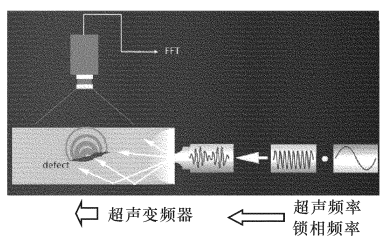


图 4　超声锁相组合激励红外成像系统原理图

Fig. 4　Principle diagram for IR imaging system with ultrasonic lens-phase stimulation

1.2.4　锁相激励红外成像

利用谐波调制源在被测物内部产生正弦波形热波(随时间变化的温度场),由材料内部缺陷所产生的反射受到入射波的干扰而在物体的表面生成一个可被红外热像仪记录的波形(图5 所示)。通过热像仪记录的序列热图像可以得到相关的“幅值”和“相位”信息。其中,“幅值”表征了反射和入射波的矢量和,“相位”则表征了反射和入射波之间的相位差。通过对这2 个物理量的考查就可以得到缺陷信息。这里要求热像仪也要具有 Lock-in(锁相)单

元，以保证激励信号的频率与热像仪的扫描频率保持一致，并且对不同的激励源提供不同的波形。

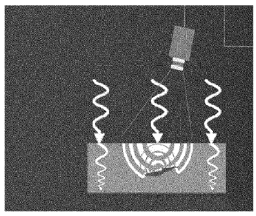


图 5 锁相激励试件红外成像

Fig. 5 Phase-lock stimulation IR imaging

1.2.5 激光激励红外成像

利用激光激励印刷电路板(PCB)上的元器件，PCB 上的器件或者焊点就会有一定的工作温度，就会发生红外辐射。利用红外探测器检测焊点表面的红外辐射，可获得焊点受激光照射时的温度变化信号，当 PCB 上存在焊点虚焊或某元器件发生故障时就会在热图上反映出来，根据热图就可以获得焊点外部或内部的虚焊和空洞等缺陷情况。图 6 是在 PCB 背面进行热激励，用红外热像仪对待检测面进行监控并采集信息，最后通过计算机进行数据处理。

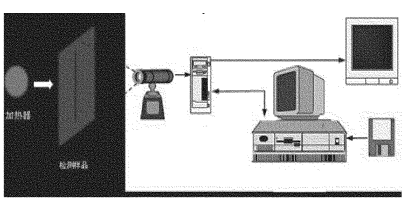


图 6 激光激励红成像系统

Fig. 6 Laser stimulation IR imaging system

总之，被动式红外成像是利用被探测物体自身的温场变化或被探测物与背景环境存在辐射温差来成像，不需要任何激励源。但是，当被测物自身处于热平衡状态或与其存在环境没有辐射温差时，仅靠热像仪常常无法获得所需的温场信息。特别是在无损检测行业，绝大多数待测试件的内部结构和缺陷在常态下不引起试件表面的温度变化。这便是很长时间以来热成像技术局限于无损检测行业的主要原因。正是基于这个局限性，主动激励下的红外成像技术应运而生。主动式热激励红外成像技术是从热传导方程出发，得出热波是随时间变化的温度场，研究的是周期、脉冲、阶梯等变化性热源与媒介材料及几何结构之间的相互作用。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场变化上反映出来。通过加载如闪光灯、超声波、激光、THz 波、热风、电流、机械振动等多种主动激励方法并用热像仪测量材料表面的温场变化，可以获取材料的均匀性信息以及其表面以下的结构信息，从而达到无损检测和探伤目的。

2 2 种热成像技术应用比较

2.1 被动热成像技术的应用

物体热辐射能量的大小和物体表面温度有关，热辐射的这个特点使人们可以利用它来对物体进行无接触温度测量和热状态分析，从而为医疗诊断、工业生产、节约能源、保护环境等方面提供一个重要的检测手段和诊断工具。

2.1.1 红外成像技术在医学领域上的应用

乳腺瘤的早期诊断、皮肤损伤病症的诊断、血管疾病的诊断、各种炎症的诊断、针灸原理和经络现象的研究、胎盘定位、器官移植排异反应监视、骨折挫伤诊断等都用到红外成像技术。

2.1.2 红外热成像技术在工农业领域中的应用

红外热成像技术在工农业领域的应用包括：建筑物、森林火灾、粮食火灾、轮胎、蒸气阀的检查和制冷设备中的应用及液化气体泄漏的监视等。

2.1.3 红外热成像技术在公安消防领域中的应用

夜间以及恶劣气候条件下目标的监控、伪装及隐蔽目标的识别、夜间以及恶劣气候条件下的治安巡逻、重点部门、建筑、仓库的保安、防火监控、消防灭火现场指挥与人员拯救、电气火灾的预防等都用到红外成像技术。

2.2 主动激励下红外热成像技术的应用

主动式激励下的红外热成像技术主要用于：1) 航空、航天有关飞行器安全的检测；2) 新材料，特别是多层复合结构材料的检测、评估和粘接、焊接质量检测及涂层检测；3) 运转设备在线、在役监测，加载或破坏性试验过程的评估，材料和涂层厚度及缺陷深度的测量，表面下材料和结构特征识别等。

2.2.1 对航空航天飞行器的检测

利用闪光灯脉冲热加载成像，通过热图可以观察到飞机铆钉处的裂缝、蒙皮锈蚀和加强筋的开裂，检测情况如图 7 所示。

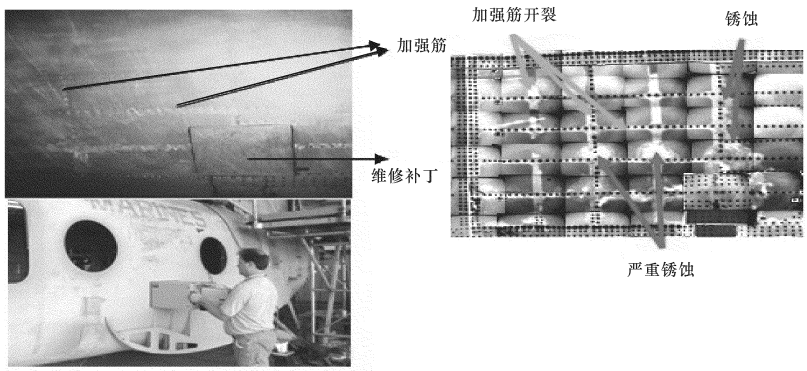
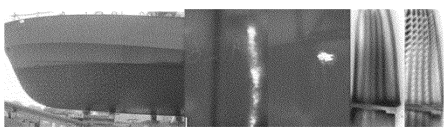


图 7　波音 737 飞机铝蒙皮的加强筋开裂与锈蚀现场检测及结果

Fig. 7　Tested result for dabber cracking and rustiness of Boeing 737

2.2.2　在电力、船舶上的应用

检测船体局部的缺陷以及涡轮发电机叶片上的缺陷,结果如图 8 所示。



(a)原图　(b)热图　(c)热图

图 8　缺陷图

Fig. 8　Pictures with defects

2.2.3　对各种复合材料的检测

利用红外成像技术可以明显地检测到蜂窝心的变形、塌陷、夹杂和分层等缺陷,检测结果如图 9 所示。

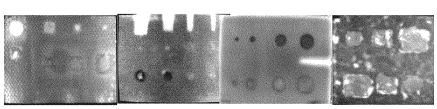


图 9　蜂窝心的变形、塌陷、夹杂和分层缺陷的热图

Fig. 9　Thermal wave defect pictures of honeycomb with distortion, collapse and delamination

2.2.4　其他应用

激光热激励对 PCB 焊点的检测及用超声激励检测飞机起落架的冲击损伤,如图 10 所示。

综上所述,被动红外成像是热像仪通过接收物体的红外辐射并把它转换为电信号从而实现无接触温度测量,即它是利用被测目标的温度不同于周围环境温度的条件,在被测目标与环境的热交换过程中进行红外检测。它可以检测运行中的设备(比如印刷电路板虚焊的检测),元器件还可用于科学试验及红外遥感。而主动激励下的红外热波检测技术具有适用面广、速度快、直观定量、非接触、观测面积大等特点。其研究和应用对提高航空、航天有关飞行器,多种军、民用工业设备的安全可靠性;新材料研究,尤其是复合材料研究;石油管道、发电设备的探伤和日常维护;承重机械设备表面下的裂纹探测,大型建筑金属结构件的裂纹、各种粘接、焊接状况、锈蚀、疲劳检测等都具有重要意义。

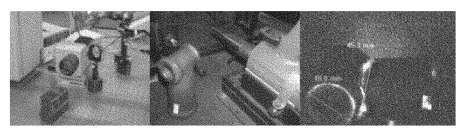


图 10　检测示意图

Fig. 10　Schematic diagram of testing

3　结束语

红外热成像技术正从实验室逐步走向工业实用化,从解决局部简单形状构件的检测走向更广泛的多种复杂构件的检测,从宏观缺陷的检测走向材料质量和力学性能的检测,红外成像技术作为一种拓宽人们感知世界能力的技术,其应用前景将会更加广阔。

参考文献:

[1] WANG X. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[J]. Applied Physics, 2001, 24(6): 96-97.

[2] 赵石彬,张存林. 红外热波无损检测中材料表面下缺

陷类型识别的有限元模拟及分析[J]. 应用光学,2007,28(5):560-561.

[3] 刘松涛. 可见光电视/红外成像复合寻的制导技术[J]. 应用光学,2006,27(6):467-468.

[5] 张淑仪. 超声红外热像技术及其在无损评价中的应用[J]. 应用声学,2004,5(5):26-29.

[6] 丁友福. 超声红外热成像技术在裂纹检测中的应用[J]. 无损检测,2006,28(11):589-590.

[7] 李艳红. 蜂窝结构的红外热波无损检测[J]. 红外与激光工程,2006,35(1):45-46.