

# 民航飞机主动红外热波成像检测技术应用进展

罗英,张德银,彭卫东,包勇,王宇  
(中国民航飞行学院航空工程学院,四川广汉 618307)

**摘要:**根据主动加热方式不同,论述了脉冲加热、锁相调制加热、超声加热、微波加热等主动红外热成像无损检测技术理论基础和技术特点;综述了主动红外热成像无损检测技术用于飞机机体结构缺陷、蒙皮腐蚀、复合材料缺陷、发动机管路堵塞与叶片裂纹等无损检测方面的研究成果;结合主动红外热成像实验技术特点,指出了其在飞机检测方面存在的问题和发展方向。

**关键词:**飞机检测;红外热成像;无损检测;主动加热

中图分类号:TN21 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.002

## Developments of active infrared thermography and its applications in civil aviation aircraft testing

LUO Ying, ZHANG De-yin, PENG Wei-dong, BAO Yong, WANG Yu  
(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:**The basic nondestructive testing theory and the technological characteristics of the active infrared thermography are introduced by illustrating the different active heating methods such as impulse heating excitation, phase lock-in heating excitation, ultrasonic excitation and microwave excitation. It is also presented the application of active infrared thermography in the fields of aircraft structure destructive testing, aircraft skin corrosion testing, composite material destructive testing, cooling passage testing and crack testing of turbine blades. The existing application problems and developing trend of aircraft testing based on the active infrared thermography nondestructive testing are also presented.

**Key words:**aircraft testing;infrared thermography;nondestructive testing;active heating

### 1 引言

主动红外热成像技术应用于飞机检测研究已有十余年历史。1990年,美国NASA Langley研究中心Heyman<sup>[1]</sup>认为1988年发生的Aloha空难<sup>[2]</sup>引起了国际民航对飞机安全状况的关注,飞机腐蚀、初始裂纹、裂纹扩展和多址损伤都可以通过强制的飞机检测和维修程序来控制。美国NASA非常关注飞机无损检测技术,认为主动红外热成像、先进超声、光声技术、磁粉检测、X射线图像等都可用于飞机无损检测。1995年,美国老龄飞机NDI有效性中心Walter<sup>[3]</sup>说,未来五年中美国国会批准给FAA 5000万美元投入老龄飞机无损检测研究。在1998年、1999年和2000年美国FAA飞机机身无损检测技术竞标中,主动红外热成像检测技术击败包括X射线、声发射、超声、涡流、目视检测等多项检测技术而唯一胜出,被NASA、FAA等政府机构和波音、洛克

西德、福特、西屋、通用等公司采用,纷纷建立主动红外热成像技术实验室,用于解决各自的飞机检测问题<sup>[4-5]</sup>。1968年,中国开始研究主动红外热成像技术,先后研制成功了HT-1型和HT-2型红外探伤仪<sup>[6]</sup>。1981年,中国开始做主动红外热成像技术应用研究,用于检测混凝土内部缺陷、轴承滚子裂纹、复合材料内部缺陷、金属内部近表面缺陷等<sup>[6]</sup>。2003年,主动红外热成像技术飞机检测应用研究列入国家“863”计划;2004年,在首都师范大学组建了国内

**基金项目:**国家自然科学基金民航联合研究基金项目(No. 60979004);中国民航飞行学院自然科学基金项目(No. J2009-26)资助。

**作者简介:**罗英(1972-),女,工学学士,工程师,主要从事航空电子设备研发,航空通信导航监视设备测试技术与故障诊断技术研究以及电子技术实验教学。E-mail:luoying202@126.com

**收稿日期:**2011-02-28;**修订日期:**2011-03-29

第一个主动红外热成像无损检测联合实验室,并开展了主动红外热成像理论和实验研究,取得了初步的研究成果<sup>[7]</sup>。2005年,该实验室在西安飞机公司测试中心安排下对国产运七型民航运输机进行了外场检测试验,这是国内首次将主动红外热成像技术用于外场真飞机检测,表明该技术逐步走向民航飞机检测实际应用<sup>[8]</sup>。近年来,国内不同研究机构开始跟踪主动红外热成像技术飞机检修应用研究<sup>[9-12]</sup>。在理论研究方面,国内研究者不落后于国外研究者;但是在实践方面,国外已经进入应用阶段,国内的研究大都处于实验阶段,产生这种差距的原因是多方面的,主要是硬件设备方面的差距<sup>[12]</sup>。就技术发展而言,有必要总结已有研究成果,跟踪新的主动红外热成像技术为飞机检测应用服务。

## 2 主动红外热成像无损检测理论基础和技术特点

主动式红外热成像技术是利用外部热源对物体进行加热,利用红外热像仪获得不同时刻被测物体表面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;该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、缺陷厚度和深度等幅度图或相位图信息。主动红外热成像特别依赖于外部热源加热条件,这是主动红外热成像与被动红外热成像具有本质差别的地方。主动红外热成像针对不同被测材质、结构和缺陷类型以及特定的检测条件,设计不同的外部热源,比如热风、高能闪光灯、高能卤素灯、超声波、电磁微波等,并用计算机控制外部热源的加热周期、脉冲宽度等,采用各种红外热像仪<sup>[13]</sup>对被测物体表面的时序热波信号进行捕捉和采集,用专门的热成像软件进行实时图像信号处理,并最终显示可视图像检测结果<sup>[14]</sup>。

主动红外热成像技术之所以成为飞机检测研究热点之一,主要在于它有区别于其他检测技术的鲜明特点<sup>[7]</sup>,新一代非制冷红外热像仪或制冷的红外热像仪比传统的热电偶测温响应快几百上千倍;红外热像仪测温范围理论下限是热力学零度,而没有理论上限,实际测温上限可达5000~6000℃;一次红外热成像测量可覆盖0.1 m<sup>2</sup>,对大型被检测对象可进行自动拼图,观测面积大;适应面广,既可用于测量金属材料,也可用于测量非金属材料;通常外部热源和红外热像仪在被测物体同侧做非接触测量,不会干扰被测物体温度场,故该技术适合测量运动的物体、危险的物体和不易接近的物体;红外热像仪输出图像信息丰富、直观易懂。另外,主动红外热成像设备可移动或便携,十分适合飞机无损检测现场

使用和在线、在役检测。

## 3 主要主动红外热成像无损检测技术及其研究进展

根据外部热源加载方式和热波信号采集处理方式的不同,主动红外热成像技术可分脉冲加热红外热成像技术、正弦锁相调制加热红外热成像技术、超声振动加热红外热成像技术、电磁加热红外热成像技术等,分别简述如下。

1984年,英国哈韦尔国家无损检测中心Milne<sup>[15]</sup>率先提出脉冲加热红外热成像技术,随后美国、加拿大等相继开展了对该技术的研究工作,目前该技术已成为各国研究得最多且最成熟的红外热成像技术之一。然而由于在求解实际热传导模型时受到复杂边界条件的限制,使之无法得出精确的解析解,各种文献上给出的解析解大部分是对实际边界条件做了一定的近似后得到的结果,与实际测量结果有较大差距,但对于分析被测物体内部缺陷还是具有指导意义。1988年,Reynolds<sup>[16]</sup>提出了求解脉冲加热红外热成像的一个简便的指数模型,得出了待测试件表面相有无缺陷区域的温度差与缺陷在物体内部相对深度的关系,定性说明了脉冲加热红外热成像技术可用于物体近表面缺陷的检测。1988年,Milne<sup>[17]</sup>提出用有限元法对受脉冲辐射加热的金属试件内近表面缺陷深度进行测量,从热传导理论出发做出了简单的二维近似分析。1991年,Lau<sup>[18]</sup>提出在脉冲加热辐射下,测量金属试件内近表面缺陷深度的简单三维模型,并做了近似分析,该模型较全面地反映了缺陷对表面温度场分布的影响关系;从该模型出发可讨论缺陷大小、深度与表面温度分布之间的相互关系。1991年,Hobbs<sup>[19]</sup>等人对金属表面不同涂层材料作了实验研究,用实验研究了材料缺陷与材料的热传导特性、实验条件、缺陷的空间分布、入射的脉冲能量以及红外热像仪的分辨之间的关系。1998年,起薛书文等<sup>[20]</sup>持续研究了脉冲红外热成像技术理论和试验,应用该技术检测了金属内部近表面缺陷,并从理论上给出评价脉冲红外热成像无损检测分辨力的依据。2000年,梅林等<sup>[21]</sup>利用有限元模拟和分析了脉冲加热红外热成像技术,成功地对多种材料进行了探伤研究和量化测量,并给出了理论模型。2006年,张存林等<sup>[22]</sup>等研究了新型脉冲热源装置并申请了中国实用新型专利。2006年,张存林等<sup>[23]</sup>采用闪光灯脉冲热源加热玻璃钢平底洞试件测试了热图,分析检验了热波单向测厚方法。2008年,李艳红、张存林等<sup>[24]</sup>提出了基于脉冲位相分析的数据处理方法以实现红外热波无损检测对缺陷深度的测量,提取了图像相位

频率信息,根据热波频率与传导深度的关系完成缺陷深度的检测。总体来讲,脉冲加热红外热成像技术是研究得最多、应用最广的技术之一,但是该技术还是存在一些缺点,比如测试试件厚度有限,对热源的均匀性要求高,与检测试件的结构有关,只适用于平板试件检测,不适于复杂形状的试件检测等<sup>[25]</sup>。

锁相调制红外热成像技术采用辐射强度按正弦规律变化的激励源加热,在加热周期的特定时刻采集多幅红外图像,计算得到物体表面各点温度变化的幅值图和相位图。被测物体表面温度以加载频率振荡变化,其幅值、相位与材料的性质、缺陷的位置有关。幅值图与局部光和表面红外特征成比例,而相位图的相位信息与缺陷深度具有对应关系,可通过计算此相位和幅值可确定缺陷的特征。被测材料的热扩散长度是锁相调制红外热成像技术的一个关键参数,它表明了到什么深度范围内热成像理论是有效的。1979年,Busse<sup>[26]</sup>研究认为锁相调制热波能检测隐藏缺陷距表面的最深深度是其材料热扩散长度的1.8倍。锁相调制红外热成像信号提取算法是该技术的关键,主要包括 Altair Lock-In 算法、4点平均算法和FFT算法三种。Altair Lock-In 算法是与法国CEDIP公司生产JADE III型红外热成像系统配套的软件算法<sup>[27]</sup>;4点平均算法是1992年,G. Busse<sup>[28]</sup>提出的一种能快速提取正弦信号幅值与相位的信息的方法;FFT算法<sup>[29]</sup>则能实现锁相处理,有效消除白噪声,在信号谱上提取锁相频率信号的幅值与相位信息。在应用研究方面,1998年,Rantala<sup>[30]</sup>用锁相超声加热激励,对聚合物材料进行红外热成像检测;2007年,Swiatczak<sup>[31]</sup>用10~100 MHz的锁相热激励红外热成像技术对多层电路板缺陷进行了检测,对电路板缺陷进行了评估。2007年,Meola<sup>[32]</sup>用锁相调制红外热波成像检测技术检测发动机桨叶的缺陷。2008年,刘俊岩等<sup>[33]</sup>以法国CEDIP公司生产的红外热像仪为硬件基础,开发了基于它的红外图像处理软件包,其研究水平达到当时国外同类水平。总体来讲,锁相调制红外热成像技术弥补了脉冲红外热波成像技术的不足,既能检测缺陷形状,也能检测缺陷深度,改善了红外热成像抗噪声干扰能力,提高了检测灵敏度。

超声红外热成像技术产生于20世纪70年代,由于红外热像仪性能原因,直到最近几年该技术才得到较好发展。该技术采用超声波作为外部激励源,热波直接由试件内部产生,当试件激发超声振动时,试件中缺陷或不均匀区域由于热弹效应和滞后效应而获得选择性加热,使得该区域热量变化通过试件表面温度异常变化表现出来,通过红外热像仪

提取缺陷信息,可显著提高对金属、陶瓷和复合材料等的浅表层的疲劳裂纹和冲击损伤的内部应力等的红外检测灵敏度<sup>[34]</sup>。超声红外热成像技术的优势在于不用考虑非均匀加热问题,即使试件有非常复杂的几何形状,也可设计合适的声发射头进行热激励。由于超声波衰减比较低,对于某些材料,声波能够在距离激发源较远或较深的地方产生有效激励,可对更深的内部裂纹进行检测<sup>[35]</sup>,并且该技术还能发现被测试件中的闭合裂纹<sup>[36]</sup>。

采用微波作为外部热源的主动红外热成像技术,应用于介质或导电材料检测已经比较普遍。1992年,Bramanti<sup>[37]</sup>介绍了微波用于介质材料无损检测情况;1994年,K. Belkebir<sup>[38]</sup>研究了微波技术用于水泥构件无损检测;1995年,Qaddoumi<sup>[39]</sup>介绍了有缺陷的厚的复合材料无损检测情况;2000年,R. Zoughi<sup>[40]</sup>总结了近场微波和毫米波激励下红外热成像技术在无损检测和无损评估方面的技术研究进展;2001年,Caorsi<sup>[41]</sup>研究微波热成像技术结合混合编码遗传基因算法用于确定二维结构件的缺陷和裂纹检测,实验证实该方法的有效性。2006年,Ghasr<sup>[42]</sup>持续用微波热成像技术研究了飞机蒙皮油漆下腐蚀坑的检测和飞机机身和机翼等关键结构件的小腐蚀坑检测问题,指出单微波探头容易受杂波回波干扰,采用双微波探头采用差分技术可克服杂波回波干扰问题。

#### 4 主动红外热成像无损检测技术在飞机检测中的应用进展

1998年起美国等西方国家率先将主动红外热成像技术应用于飞机检测研究,包括飞机复合材料构件内部缺陷及胶接质量检测、飞机蒙皮铆接质量和蒙皮下隐性腐蚀检测、飞机发动机桨叶上的裂纹检测、飞机机体和机翼上裂纹检测等;中国于2005年起将主动红外热成像技术用于民航飞机机体及其部件检测,取得了较好的研究结果。

由铝蜂窝夹层结构制成的飞机机身、机翼存在的缺陷主要包括间隙型缺陷、紧贴型缺陷、弱胶接和芯子缺陷等<sup>[4]</sup>。目前实际检测中遇到最多的是飞机蜂窝结构的脱粘缺陷、腐蚀损伤和焊接铆接损伤。Kuo等<sup>[43]</sup>用红外热成像技术对脱粘缺陷进行检测,比较和识别了损伤特性,对试件粘接质量做出快速有效的检测。李慧娟等<sup>[44]</sup>用法国CEDIP公司生产JADE III型红外热成像系统及其配套软件检测了铝蒙皮蜂窝夹层结构,认为飞机铝蜂窝夹层结构可用脉冲或锁相调制红外热成像技术对其进行检测,不仅能检测飞机铝蜂窝结构的脱粘缺陷,也能检测粘接不良的缺陷。

飞机蒙皮损伤大致有冲击损伤、疲劳损伤、腐蚀损伤、粘接损伤、焊接损伤和铆接损伤等。主动红外热成像技术对飞机蒙皮及其蒙皮下比如加强筋损伤开裂的检测可以取得有效的检测结果,并且还能对损伤做定量分析,比如损伤深度、锈蚀程度以及能区别是积水还是渗漏的液压油等<sup>[45]</sup>。

对于飞机碳纤维增强多层复合材料试件缺陷检测问题,Wang Xun 等<sup>[46]</sup>研究认为利用脉冲加热红外热成像可获得不同时间热图上显现的不同深度层的损伤状况。李艳红等<sup>[47]</sup>采用脉冲红外热成像技术对用于航空航天的碳纤维层压板进行了测试,所得热图清晰地展现了被检材料内部的缺陷情况。

飞机发动机涡轮叶片的故障检测是发动机安全检测的重要环节,主要包括热障涂层损伤、冷却通道堵塞和裂纹检测三个方面<sup>[48]</sup>。采用热风作为激励源对正常叶片和故障叶片对比测试,可确定热障涂层损伤情况;采用高能氙灯对叶片进行热激励,热像仪高速记录叶片表面的瞬态温度变化,通过热图像重构叶片内部温度场,可判断叶片内部通道是否发生堵塞;采用低频高能锁相超声为热激励源,利用红外热像仪对比测试正常叶片和故障叶片的热图,可判断故障叶片的裂纹形态与深度。

飞机机身、机翼、起落架和内部零部件等结构的裂纹检测是主动红外热成像技术的应用重点。从目前应用情况看,脉冲加热、锁相超声加热、微波加热等主动红外热成像技术都可应用于飞机部件裂纹检测,主动红外热成像技术对飞机蒙皮的疲劳裂纹、铸铝引擎外壳的裂纹、钢曲轴的裂纹、铜焊裂纹、蒙皮下加强筋裂纹等各种表面裂纹进行检测的结果都很成功<sup>[10]</sup>。只要超声发射头设计得当,超声加热红外热成像技术可对飞机起落架旋转臂、螺栓孔等承力结构疲劳裂纹或应力裂纹检测并能给出早期报警<sup>[46]</sup>。另外对一些小而精密裂纹目标,比如飞机钛合金中 20  $\mu\text{m}$  长的裂纹、飞机发动机桨叶上的裂纹和飞机机翼上 5 cm 长的裂纹,美国韦恩州立大学制造研究所用超声加热红外热成像技术对它们都进行了成功测试并且得到较好的研究结果。

在飞机维修中,腐蚀所造成的成本消耗最大,并大大降低了飞机的有效工作时间,特别是老龄飞机腐蚀危及飞机安全,对其检测非常重要。脉冲红外热成像技术很适合于飞机大面积隐藏腐蚀检测,1998 年,Thomas<sup>[49]</sup>研究了脉冲加热红外热成像技术应用于飞机蒙皮上紧固件周围腐蚀检测,所得腐蚀热图清晰明确。2000 年,王迅等<sup>[5]</sup>研究了锁相超声红外热成像技术用于飞机蒙皮锈蚀厚度的定量测量,测量精度达到较高水平,比如 1 mm 厚铝板的腐

蚀检测精度可达到微米级。2006 年,Ghasr<sup>[42]</sup>用 V 波段微波差分探头研究了处于恶劣自然环境中的飞机机身和机翼等关键结构件的小腐蚀坑检测问题,指出单微波探头容易受杂波回波干扰,而双微波探头采用差分技术则很好克服杂波回波干扰问题,能很好地从噪声中把结构缺陷检测出来。

## 5 结束语

对于飞机检测应用而言,主动红外热成像技术逐步成为一种常规技术手段,将继续朝着定量测试、高分辨力、外部加热方式多样化和精确化、损伤缺陷测试自动化方向发展。随着飞机老龄化现象加剧,主动红外热成像技术在飞机检测方面的应用将更加广泛,然而,主动红外热成像飞机检测技术也存在一些应用问题:操作人员本身红外辐射对测试结果有影响需要屏蔽检测;受发射率不均匀和背景辐射的影响,对一些发射率很低的金属表面,检测前要进行表面处理,在试件表面涂一层易擦洗且较薄的涂料,能显著提高检测效果;检测的灵敏度随缺陷所处深度的增加而迅速下降;由于热传导会使缺陷边缘的热图显示扩大和模糊,清晰度变差;对较大的工件加热外部热源不易解决。外部热源发射头的设计和制造,必须根据不同构件裂纹产生部位的形状特点和原位检测要求,综合考虑到通用性、便携性、内部可达性问题。热流注入方向将直接影响检测结果及检测灵敏度,要针对不同导热系数,不同材质,不同结构的缺陷选择合适的热流注入方向;外部加热方式及加热能量与加热时间控制正确与否最终影响主动红外热成像损伤缺陷检测灵敏度的高低。主动红外热成像飞机检测技术进步是不断总结经验、改进设备和外部加热条件的结果,因此对外部主动加热方法及其对热图像影像质量的影响因素探究还需要经过大量实验室试验、实地试验、外场试验。

## 参考文献:

- [1] J S Heyman. NDE research for aging aircraft integrity [C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1990: 976 - 981.
- [2] Erin E Murphy. Ageing aircraft: too old to fly [C]. IEEE Spectrum, 1989: 28 - 31.
- [3] Danna K Henderson. When aircraft get cracking [J]. Air Transport World, 1995, 32(3): 71.
- [4] J F Wang. Infrared thermal wave imaging nondestructive detecting technology used in america [J]. Nondestructive Inspection, 2004, 28(5): 1 - 4. (in Chinese)  
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.
- [5] X Wang, W P Jin, C L Zhang, et al. Actuality & evolution of infrared thermal wave nondestructive imaging technology [J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(10):

- 497 - 501. (in Chinese)  
王讯,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.
- [6] G C Gao. Two-dimensional computer simulation & image processing of Infrared thermal imaging nondestructive testing[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics master's Thesis,2006:1 - 4. (in Chinese)  
高功臣. 红外热成像无损检测的二维计算机仿真与图像处理[D]. 北京:北京航空航天大学,2006:1 - 4.
- [7] W P Jin, C L Zhang. New technology of materials detection and characterization[J]. Industry Perspective,2004,(9):52 - 55. (in Chinese)  
金万平,张存林. 材料检测和表征的新技术 - 热波检测及其应用[J]. 产业透视,2004,(9):52 - 55.
- [8] B Liu. The study and application of pulsed excitation-device with flashing lamps array based on infrared thermal wave nondestructive testing system [D]. Beijing: Capital Normal University,2006:8 - 9. (in Chinese)  
刘波. 红外热波无损检测系统中闪光灯阵列脉冲热激励装置的研制和应用[D]. 北京:首都师范大学,2006:8 - 9.
- [9] D X Wu, T S Huang. Infrared thermal imaging technique for formed damage in aircraft components [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2008,21(3):150 - 152. (in Chinese)  
吴德新,黄通生. 飞机零部件成形损伤红外热成像检测技术[J]. 机电产品开发与创新,2008,21(3):150 - 152.
- [10] X L Yang, X R Xie, T Jiang. Fatigue crack testing of infrared imaging by vibrothermography [J]. Laser & Infrared,2007,37(5):442 - 444. (in Chinese)  
杨小林,谢小荣,江涛. 疲劳裂纹的振动红外热成像检测[J]. 激光与红外,2007,37(5):442 - 444.
- [11] P Xu, F L Luo. Aircraft multi-layer structure corrosion defects detection system research and implementation [J]. Electronic Design & Application World, 2005, 10: 96 - 98. (in Chinese)  
徐平,罗飞路. 飞机多层结构腐蚀缺陷检测系统的研究和实现[J]. 电子设计应用,2005,10:96 - 98.
- [12] Y C Sun, B S Sun, Q S Ma. Progress of hidden corrosion detection in aircraft [J]. Infrared Technology, 2007, 29(2):121 - 123. (in Chinese)  
孙延春,孙步胜,马齐爽. 飞机隐藏腐蚀检测的进展[J]. 红外技术,2007,29(2):121 - 123.
- [13] H Ermert, R L Melcher, F Dacol. Non-contact thermal wave imaging using infrared radiation [C]. IEEE Ultrasonics Symposium,1984:639 - 646.
- [14] L D Favro, T Ahmed, D Crowther, et al. Infrared thermal wave studies of coatings and composites [C]. Thermosense XIII, SPIE, 1991, 1467:290.
- [15] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composite and other materials by thermal pulse video thermography [J]. SPIE, 1984, 520(6):119 - 122.
- [16] Reynolds W N. Inspection of laminates and adhesive bonds by pulsed-video video thermography [J]. NDT international, 1988, 21(4):153 - 158.
- [17] Milne J M. A transient thermal method measuring the depths of subsurface flaws in metals [M]. British Journal of NDT, 1988, 30(5):77 - 80.
- [18] S K Lau, D P Almond. A quantitative analysis of pulsed-video thermography [J]. NDT & E international, 1991, 24:195 - 205.
- [19] Hobbs C, Temple A. The inspection of aerospace structures using transient thermography [J]. British Journal of NDT, 1993, 35:183 - 189.
- [20] S W Xue, et al. Pulsed video IR thermography testing of subsurface defects in metal [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998, 17(6):424 - 428. (in Chinese)  
薛书文,等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表面缺陷[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(6):424 - 428.
- [21] L Mei. Pulse thermography analyzed by the finite element method for nondestructive testing [J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2000, 34(1):66 - 70. (in Chinese)  
梅林. 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.
- [22] B Liu, C L Zhang, L C Feng. A study of pulsed excitation-device with flashing lamps array based on infrared thermal wave nondestructive testing system [J]. China Instrumentation, 2006, 12:38 - 44. (in Chinese)  
刘波,张存林,冯立春. 基于红外热波无损检测系统中闪光灯阵列脉冲热激励装置的研制[J]. 中国仪器仪表,2006,12:38 - 44.
- [23] X C Zhang, W P Jin, Y H Li, et al. Measurement of thickness of glass fiber reinforced plastic flat bottom hole sample by infrared thermal NDT [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(1):16 - 18. (in Chinese)  
张小川,金万平,李艳红,等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. 激光与红外,2006,36(1):16 - 18.
- [24] Y H Li, Y J Zhao, L C Feng, et al. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1):55 - 58. (in Chinese)  
李艳红,赵跃进,冯立春,等. 基于脉冲位相的红外热波无损检测法测量缺陷深度[J]. 光学精密工程,2008,16,(1):55 - 58.
- [25] J H Zhang, G P Guo. Rapid development of the thermal images at home and abroad nondestructive testing technology [J]. NDT, 2005, 29(1):1 - 4. (in Chinese)  
张健合,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.
- [26] G Busse. Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal[J]. Appl. Phys. Lett., 1979, 35: 759-760.
- [27] Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: a tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures[C]. Proceedings of SPIE, Thermosense XXIII, 2001, 4360: 560-566.
- [28] G Busse, D Wu, W Karpen. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(8): 3962-3965.
- [29] B Wiecek, T Wajman, G Gralwicz, et al. Theory and measurements of single and multilayer structures using lock-in and pulse thermography[C]//Thermosense XXV Conference, 21-25 April 2003, Orlando, Florida, USA.
- [30] J Rantala, D Wu, G Busse. NDT of polymer materials using lock-in thermography with water-coupled ultrasonic excitation[J]. NDE & E. Intern, 1998, 31(1): 43-49.
- [31] T Swiatczak, B Wiecek, K Tomalczuk. Convective cooling evaluation of electronic devices using lock-in thermography[C]//Mixdes 2007, Ciechocinek, Poland, 21-23 June 2007: 363-368.
- [32] C Meola. Nondestructive evaluation of materials with rear heating lock-in thermography[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(10): 1388-1389.
- [33] J Y Liu, Y Wang, J M Dai. The study on infrared lock-in thermography technology based on image sequences processing[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7): 654-658. (in Chinese)  
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.
- [34] Y Hong, P C Miao, Z N Zhang. The ultrasonic infrared thermography and its application in NDE[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2003, 39(4): 547-552. (in Chinese)  
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, 2003, 39(4): 547-552.
- [35] Steven M Shepard, Tasdiq Ahmed, James R Lhota. Experimental considerations in vibrothermography, thermal wave imaging[C]. Proc. SPIE Thermosense, 2004, (4): 12-16.
- [36] Y F Ding, X C Zhang, X L Yang, et al. Application of thermosonic for crack detection[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(12): 620-622. (in Chinese)  
丁友福, 张小川, 杨小林, 等. 热超声技术在裂纹检测中的应用[J]. 无损检测, 2006, 28(12): 620-622.
- [37] M Bramanti, E Salerno. Electromagnetic techniques for nondestructive testing of dielectric materials: Diffraction tomography[J]. Microwave Power, 1992, 27(4): 1033-1036.
- [38] K Belkebir, C Pichot, J C Bolomey, et al. Microwave tomography system for reinforced concrete structures[C]//Proc. 24<sup>th</sup> EuMC, 1994, 2: 1209-1214.
- [39] N Qaddoumi, S I Ganchev, G Carrière, et al. Microwave imaging of thick composites with defects[C]. Mater. Eval., Aug., 1995, 53(8): 926-929.
- [40] R Zoughi. Recent advances in near-field microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation techniques[C]//Proc. AP, 2000, Davos, Switzerland, 2000.
- [41] Salvatore Caorsi, Andrea Massa, Matteo Pastorino. Microwave probe-crack identification microwave procedure Based on a genetic algorithm for nondestructive testing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(12): 1812-1820.
- [42] M T Ghasr, B Carroll, S Kharkovsky, et al. Millimeter-wave differential probe for nondestructive detection of corrosion precursor pitting[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(5): 1620-1627.
- [43] H J Li, D L Wu, J T Wang, et al. Various nondestructive testing methods of aluminum envelope honeycomb sandwich structure[J]. NDT, 2009, 33(2): 9-12. (in Chinese)  
李慧娟, 吴东流, 王俊涛, 等. 铝蒙皮蜂窝夹层结构的各种无损检测方法[J]. 无损探伤, 2009, 33(2): 9-12.
- [44] P K Kuo, T Ahmed, L D Favro, et al. Infrared thermal wave imaging of adhesion defects[C]//17<sup>th</sup> Symposium on NDE Proceedings, 1989: 238.
- [45] R L Thomas, Han Xiaoyan, L D Favro. Thermal wave imaging of aircraft for evaluation of disbonding and corrosion[C]//ECNDT'98, The e-Journal of Nondestructive Testing, 1998, 3(12).
- [46] Wang Xun. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. USA: Wayne State University, 2001.
- [47] Y H Li, C L Zhang, W P Jin, et al. IR thermal wave non-destructive inspection of carbon fiber composite material[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(4): 262-264. (in Chinese)  
李艳红, 张存林, 金万平, 等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 262-264.
- [48] X S Xie, F Yan, J J Lu, et al. The applications of thermal wave NDT in turbine blades testing[J]. Infrared Technology, 2007, 29(9): 552-555. (in Chinese)  
谢兴盛, 颜芳, 陆佳佳, 等. 红外热波无损检测技术在涡轮叶片探伤中的应用[J]. 红外技术, 2007, 29(9): 552-555.
- [49] R L Thomas, L D Favro, P K Kuo. Thermal wave imaging of hidden corrosion[R]. AD Report, ADA343638, 1998.