

超声红外热像技术及其在无损评价中的应用^{*}

张淑仪

(南京大学声学研究所 南京 210093)

2004年5月8日收到

摘要 本文介绍在光热红外检测的基础上发展的超声红外热像技术。该技术利用超声脉冲作为激发源,当超声脉冲在试样上传播的过程中遇到裂纹等缺陷时,缺陷引起超声附加衰减而局部升温。利用红外照相机获取试样表面的温度分布,可显示裂纹等缺陷。超声红外热像技术发挥了超声和红外技术的优点,可实时地检测裂纹等缺陷,在无损评价和检测中有广泛应用。

关键词 超声检测, 红外成像, 无损评价和检测

Ultrasonic infrared thermography and its applications in nondestructive evaluation

ZHANG Shu-Yi

(*Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract An ultrasonic infrared thermography has been developed based on photothermal infrared detection, in which a short pulsed ultrasound is used as excitation source and an infrared (IR) camera is used to detect the temperature distribution of the sample. As the ultrasonic pulse is absorbed by cracks or other defects the local temperature increases additionally, then the IR camera can display the cracks or defects in real-time. The new technique has the advantages of ultrasonic and IR camera imagings, and has been widely applied in NDE and NDT.

Key words Ultrasonic detection, IR imaging, NDE/NDT

1 引言

由于高新技术和国防工业的发展,特别是航空、航天技术和核工业等的发展,对安全和可靠性的要求越来越高,无损评价或无损检测技术的应用越显重要。作为传统的无损检测技术,常用的有超声波、X-射线、涡流、染色和磁粉等检测技术,半个多世纪以来广泛应用于机

械工业、核工业和航空航天技术。各种技术都有其特殊的优点和不足之处,其应用范围各有一定限制。因此,随着现代科学技术的发展,新的无损检测和评价技术不断涌现出来。

利用红外技术对固体表面的温度分布进行扫描成像,可反映固体内部结构(如空穴和裂纹等缺陷)。传统的无外源红外扫描成像技术,很久以前就开始用于化工设备、建筑物、传输线

^{*} 国家自然科学基金委员会资助 (10174038)

和电子器件等的连续观测,如炉壁厚度检测、发热部件和周围的热交换阻断检测和集成电路的失效元件检测等等^[1,2]。对于温度均匀的设备,又可以适当方式激发热流通过被检测的固体材料,注入的热量使缺陷表面局部温度明显改变,利用红外扫描成像技术记录下温度场的分布,即利用有源模式红外扫描成像技术进行检测^[3]。这些红外技术不需要物理接触或耦合剂,且没有放射性危害等优点,然而检测速度较慢。一种新技术要被人们接受,并得到广泛应用,必须具有很强的应用潜力,如可靠性、灵敏度、检测速度和使用经济等优点,才能具有竞争力。

本文介绍的超声红外热像技术,发挥超声和红外热像技术的优点^[4,5]。利用超声在传播路径上由于缺陷等不均匀结构引起超声的附加衰减,使缺陷局部温度升高,同时利用红外照相机以较大的视场显示被检测物体的表面温度分布,而不必考虑超声源与缺陷之间的相对方位和距离。由此,利用超声红外热像技术来显示设备的缺陷或其他不均匀结构,具有可靠性强、灵敏度高、检测速度快和使用方便等优点,必然会引起高度重视,并得到广泛应用。

2 发展概况

自 20 世纪 70 年代中期光声效应研究复苏以来,随着现代光声学科的发展,光热效应研究相应发展起来,因为光声效应可以看作是光热和热声两个效应组合的结果。光热效应检测有多种方法, Busse 等^[6]提出利用强度调制的激光引起样品温度升高而产生红外辐射,利用红外光电器件接收这红外辐射,称为光热辐射技术。由于光束聚焦照射于样品,光束必须扫描才能检测样品的不均匀结构(如亚表面的缺陷),这是很初步的光热检测实验。

另一方面, Kuo 等^[7]提出利用氙灯闪光灯作为激发源,光束大面积照射在测试的样品(机件)上,样品吸收脉冲光能而产生热波,

并发出红外辐射,利用红外视频照相机接收样品发出的红外辐射,可以使样品表面(或亚表面)的温度分布实时成像,其成像装置如图 1 所示。如果样品结构不均匀,则引起表面(或亚表面)的温度分布不均匀,因此可以检测样品的缺陷、杂质或其他不均匀结构,亦称为光热红外成像技术^[8]。其优点是可以非接触式、实时地进行较大面积的检测。缺点是灵敏度和信噪比不是很高,因为微小的不均匀结构对光的吸收、以及随之产生的热量与本底差异不是很大。为了提高灵敏度和信噪比,必须使光源强度加大,所以常常需要用多个千瓦级的氙灯同时照射样品,或者采用锁相(Lock-in)或积分平均(Boxcar)技术,以改善信噪比^[9,10],但是这样降低了成像速度,不利于实时成像。

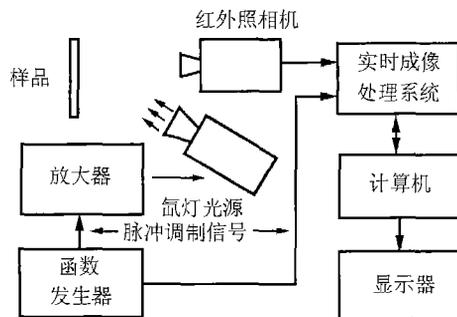


图 1 光热红外成像检测系统

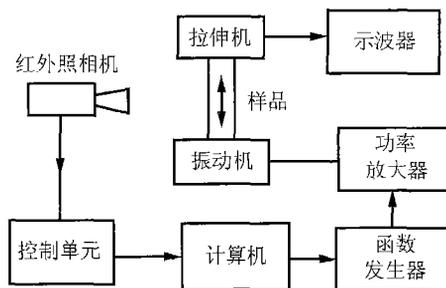


图 2 调幅超声热波红外成像系统

进一步, Busse 等^[11]提出利用低频调幅的超声波作为激发源,作用于样品使样品加热,同时用红外照相机检测样品表面的温度分布,

如图 2 所示。如果样品结构不均匀,引起超声波的附加吸收,使表面温度不均匀分布。由于超声波能在样品中传播很远距离,红外照相机有相当大的视场,可以比较方便地对样品进行实时无损检测。其缺点是振幅调制的超声波能量小,检测灵敏度较低。

3 超声红外热像技术

在上述脉冲光源照射下的红外热波成像和低频调幅超声作用下的超声红外成像的基础上, Favro 等 [12] 进一步提出将脉冲超声检测与红外热像技术结合起来,同时发挥两者的优点。即利用脉冲超声作为激发源,在样品材料上激发脉冲声波,由于脉冲声能量集中,强度增强,在传播的过程中与缺陷或应力集中的区域或其他不均匀结构相互作用,能引起超声显著的附加衰减,使不均匀区域产生明显的附加局部温度升高,从而使这些不均匀结构能显著地表现出差异。于是,利用红外照相机很容易将这些温度不均匀区域显示出来,称为超声红外热像技术。

3.1 超声红外热像技术装置

超声红外热像技术的装置框图如图 3(a) 所示。超声发生器由电源和换能器(包括压电片和聚能杆)组成,超声发生器电源的电功率一般为 300~1000W,产生频率为 10~50kHz 范围的电脉冲,经换能器激发超声脉冲,通过聚能杆与样品紧密接触,使超声能量集中作用于样品(工件)上。在聚能杆与材料之间需加适当的耦合材料,以提供最佳超声阻抗匹配。红外热像仪的检测波长一般为 8~12 μm ,温度分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。实验系统如图 3(a) 和 (b)[12,13] 所示。

3.2 超声红外技术应用实例

为试验对疲劳裂纹的检测,用 16cm 长、10cm 宽、3cm 厚的铝合金板作为样品。首先在铝合金板的边缘锯一条约 2cm 长的细缝,在细缝两边进行扭力作用,使其底部产生约 0.2mm

宽、3mm 长的疲劳裂纹,裂纹周围因扭力作用引起损伤,表面有些平整。为作对照,在这一细缝左边,再锯一条相似的细缝,但其底部没有疲劳裂纹。对这样加工处理的铝合金板,超声红外检测的结果如图 4 所示 [12]。

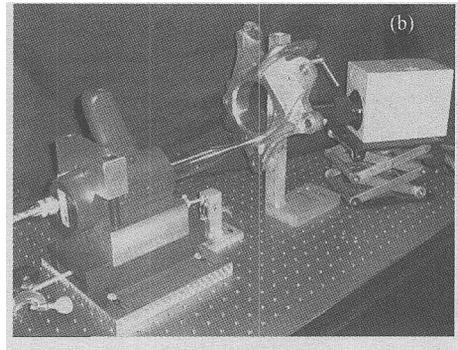
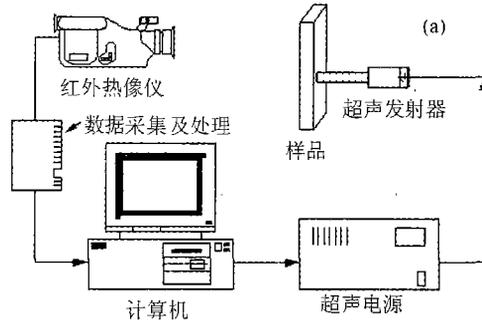


图 3 超声红外热像系统

(a) 方框图 (b) 实验系统

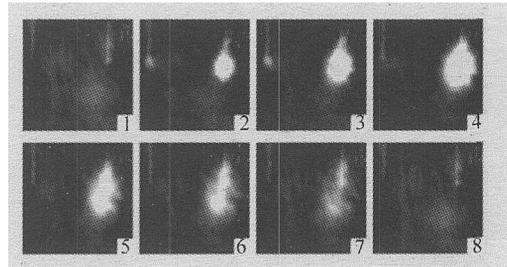


图 4 铝合金板(含锯缝和裂纹)的超声红外热像图,右锯缝底部有疲劳裂纹,左锯缝无疲劳裂纹:
1,无超声波作用时红外热像; 2~4,超声作用期间裂纹区亮度渐增; 5~8,超声作用停止后裂纹区亮度渐消 [12]

从图 4 可看到,在超声作用下,红外热像

上裂纹处亮度逐渐变亮,如图4中的2~4所示。说明在超声开始作用以后,裂纹处局部温度逐渐升高。当超声作用停止后,裂纹处的亮度逐渐减弱,如图4中的5~8所示。说明局部加温区因热能向周围扩散而逐渐降温,恢复到与周围温度相一致。从图4还可看到,左边细缝底部虽无裂纹,在超声作用期间,局部温度也有所升高,特别是图4中的2~3所示。说明锯缝过程中引起结构改变,如产生剩余应力等,使局部温度高于周围的温度。由此说明超声红外热像技术对缺陷、不均匀结构或剩余应力分布均非常敏感。在图4中,由于铝合金板表面油迹污染,使发亮区域的边缘很不规则。

Favro等^[13]利用超声红外热像技术,对碳纤维增强的聚合物层状复合材料的样品进行检测,复合材料经冲击损伤预处理,引起内部分层缺陷。并将超声红外检测结果与光热红外成像结果进行比较,如图5所示。从图5看到,超声红外热像更清楚地显示亚表面特性,且信噪比更高;同时对于微小的分层,超声产生的热能更大,因此对微小的缺陷更为灵敏。而光热红外成像,由于纤维导热较强,对受光照区域的纤维分布也很敏感,因此可显示亚表面层纤维的分布,而对缺陷的信噪比较差。

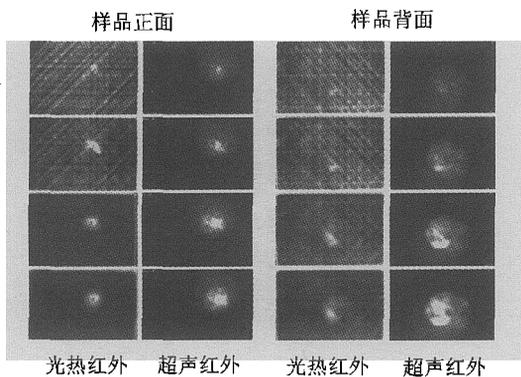


图5 纤维增强复合材料,材料的光热红外成像与超声红外成像的比较^[13]

由于超声脉冲作用时间很短,一般小于1s,同时红外照相机的视场较大,可以实现快速实时成像和检测,可用于机件在运转状态下的动态成像,所以超声红外热像技术是具有广泛应用价值的无损检测新技术。

3.3 超声红外热像技术理论背景

虽然光热红外成像和超声红外热像技术已先后发展为有效的无损评价和检测技术,并广泛应用于新材料和高新技术设备的安全运行和可靠性检测^[14],但对于这些技术的理论基础研究得很少。通常认为,裂纹处升温主要是由裂纹两边在超声作用下互相摩擦产生,直接利用摩擦发热的理论进行计算^[15,16]。

最近,我们考虑到裂纹在超声作用下产生振动,且由于裂纹两边的相位不一致,将产生接触、碰撞、滑移、摩擦等过程。根据动接触模型,利用有限元方法计算了上述过程中产生的热量。再由三维瞬态热扩散方程出发,利用有限元方法计算了热扩散过程。对裂纹在超声波作用下,局部温度升高,引起热量扩散,以及当超声作用停止以后,高温区域逐步降温,最后达到热平衡的过程,进行了模拟计算。对于有限元网格的划分及对实验现象的理论模拟,分别如图6和图7所示^[17,18]。在图7(a)的实验图像中,由于表面油迹污染,本底灰度很不均匀。

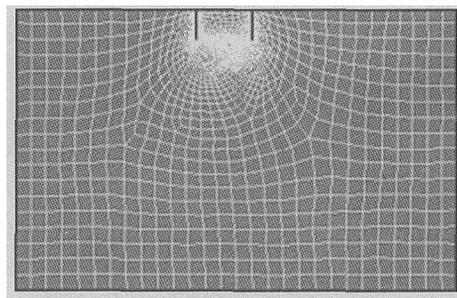


图6 铝合金板的有限元网格

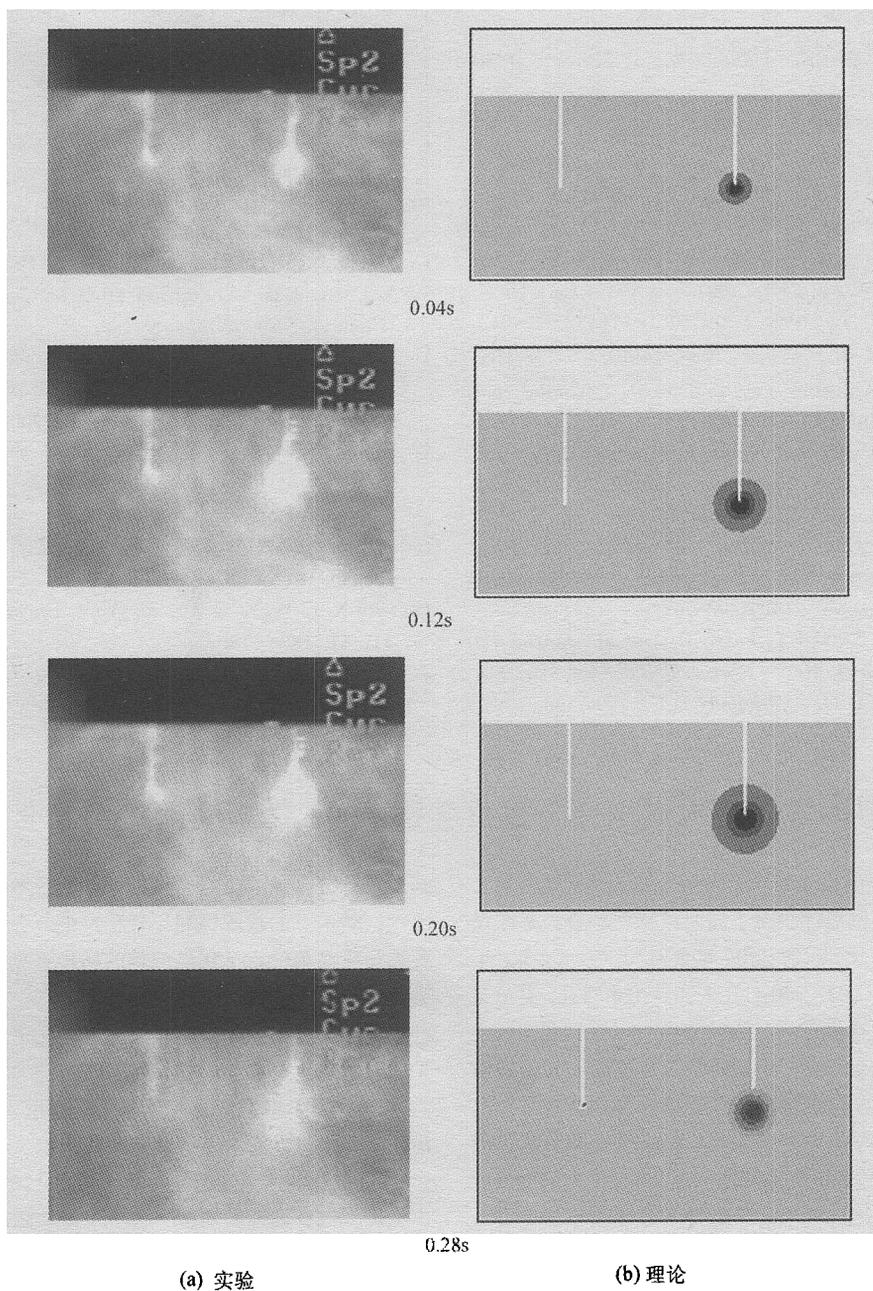


图7 超声引起局部升温的实验结果和理论模拟结果(超声脉冲宽度为0.2s)

4 结束语

近年来, 超声红外热像技术越来越引起广泛地注意和重视, 除应用于大型高技术设备

的无损检测外, 也应用于材料的参量定征。并且, 从理论和实验两方面, 对超声作用裂纹引起的各种现象进行了更进一步地深入的研究 [19,20]。

参 考 文 献

- 1 Reynolds W N. *Canad. J. Phys.*, 1986, **64**(9):1150~1154.
- 2 王康印. 红外检测. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- 3 Vasilov V P, Taylor R. Research techniques in non-destructive testing, Vol.V, Ed. Shape R S, London: Academic Press, 1982.
- 4 Szilard E J 主编, 陈积懋、余南延译. 超声波检测新技术. 北京: 科学出版社, 1991.
- 5 Elliott C T. *Electron. Lett.*, 1981, **17**(18):312~313.
- 6 Busse G. *J. de Physique*, 1983, **44**(10):C6471~478.
- 7 Kuo P K, Ahmed T, Favro L D et al. *J. Nondestruct. Evaluat.*, 1989, **8**(2):97~106.
- 8 Favro L D, Jin H J, Wang Y X et al. *Rev. Prog. QNDE*, Vol.11A, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 1992, 447~451.
- 9 Ahmed T, Kuo P K, Favro L D et al. *Rev. Prog. QNDE*, Vol.8A, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 1989, 607~612.
- 10 Kuo P K, Ahmed T, Favro L D et al. *Jaarinen J, Hartikainen J, Rev. Prog. QNDE*, Vol.8B, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 1989, 1305~1310.
- 11 Busse G, Wu D, Karpen W. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(8):3962~3965.
- 12 洪毅, 缪鹏程, 张仲宁等. 南京大学学报, 2003, **39**(4):547~552.
- 13 Favro L D, Han X Y, Ouyang Z et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**:2418~2421.
- 14 Favro L D, Han X Y, Ouyang Z et al. *Prog. Nat. Sci.*, 2001, **11**(supl.):S133~136.
- 15 Davis W R, Rankin M B. *Rev. Prog. QNDE*, Vol.22A, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 2003, 492~499.
- 16 Balasubramanian K, Nair N V, Veeraraghavan S et al. *Rev. Prog. QNDE*, Vol.22A, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 2003, 525~530.
- 17 Mi X B, Zhang S Y, Han X Y. 13th Int. Conf. Photoacoustic and Photothermal Phenomena (Rio de Janeiro, Brazil, July 2004).
- 18 缪鹏程, 米小兵, 张淑仪等. 南京大学学报, (即将发表 2004).
- 19 Han X, Li W, Zeng Z et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17):3188~3190.
- 20 Perez I, Davis W R. *Rev. Prog. QNDE*, Vol.22A, Eds., Thompson D O & Chimenti D E, (Plenum, NY), 2003, 505~512.

中国声学学会水声学分会委员会暨 2004 年全国水声学术会议

中国声学学会水声学分会第五届二次全体委员会暨由分会与中国海洋学会下属海洋物理分会、海洋观测技术分会联合组织的 2004 年全国水声学术会议, 于 2004 年 5 月 27 日至 30 日在安徽黄山市召开。委员会会议由水声分会主任马远良院士主持, 张仁和、杨士莪、李启虎院士与会, 中国科学院声学所所长田静研究员、中国声学学会秘书长宗健研究员到会指导。出席的中国声学学会常务理事和水声学分会委员超过应到委员半数。马远良院士回顾了自 2001 年大同会议以来水声分会开展的学术活动。本次学术会议的论文, 无论从篇数上看, 还是质量上看, 在历次水声学术会议中是很突出的。委员会上研究了两个主要问题, 一是明年分会学术活动中的时间和地点问题, 认为明年学术活动应结合换届的分会委员会和代表大会进行, 时间以 11 月份为宜。地点初步选在武夷山等三处, 由秘书处考察落实。二是委员换届改选问题, 委员们十分重视, 认为选好下届委员是继续办好水声分会的关键。会议一致认为挂靠单位的支持对分会的顺利运行是必要的, 主任、副主任人选也不要变更太多, 委员人

选应按行之有效的历届委员推选办法, 考虑代表的广泛性、学术上的权威性和年轻化, 由分会秘书处征求各委员所在单位意见作出调整的初步意见, 再由委员会决定。个别单位由于学术方向的改变, 有可能对于继续参加本分会工作兴趣不大, 拟在征求这些单位意见后取消其代表名额。

会议对不幸逝世的关定华、周福洪、郑兆宁、阎福旺四位水声界前辈表示哀悼和怀念。

水声学学术交流会议征得学术论文 116 篇, 涵盖水声物理、信息处理、水声工程、水声基阵和水声换能器等方面, 比较全面地反映了我国水声学研究的当前动态, 也是论文作者的最新研究结果。论文由《声学技术》出版增刊。与会的代表来自 36 个单位, 共 103 人, 学术交流不分小组可以让大家特别是青年声学工作者和研究生能学习和交流水声各个领域的知识和成果, 有助于启发开拓自己的研究思路和灵感。在大会上计有 62 人发言, 张仁和院士、田静研究员做了综述性报告。会议交流充分、讨论热烈、大家感到收获不小。

(中国声学学会水声学分会)