

超声红外热像技术中裂纹的识别和重构

冯辅周¹, 张超省¹, 袁建², 江鹏程¹

(1. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072; 2. 装甲兵工程学院 基础部, 北京 100072)

摘要: 超声红外热像技术结合了超声激励和红外热像两种手段来检测材料和结构中裂纹等缺陷, 是一种新型的无损检测技术。在推导了超声激励下裂纹热量传导的一维简化模型的基础上, 采用基于控制标记符的分水岭分割和骨架描述法实现了超声红外热像技术中裂纹信息的识别与重构, 并采用 Matlab 开发了相应的算法软件。试验结果证明了方法的可行性和准确性。

关键词: 超声红外; 图像识别; 图像重构

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)11-0017-04

Identification and Reconstruction of Cracks in Ultrasonic IR Imaging

FENG Fu-Zhou¹, ZHANG Chao-Sheng¹, YUAN Jian², JIANG Peng-Cheng¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. Department of Fundamental Courses, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Ultrasonic IR Thermal is a novel NDE technique, which combines a short ultrasonic pulse excitation and infrared imaging to detect defects, such as crack, in materials and structures. A simplified one-dimension heat-conduction model excited by ultrasonic pulses was put forward in this paper. Based on this model, a series of image processing methods for identification and reconstruction of cracks were presented. Results obtained showed the methods were feasible and accurate.

Keywords: Ultrasonic IR; Image identification; Image reconstruction

超声红外热像技术结合了超声激励和红外热像两种手段来检测材料和结构中裂纹等缺陷, 是一种新型的无损检测技术^[1]。超声激励机理研究的深入和红外热像技术的发展, 使得该技术在装甲装备底板裂纹检测上的应用成为可能。由于受装甲装备底板材料、超声激励功率和红外热像仪精度等因素的限制, 裂纹生热产生的表面温度场变化信号通常较弱, 人眼难以直接提取和识别裂纹信息, 更难以重构裂纹形状。因此, 如何有效地识别裂纹信息和重构裂纹形状已经成为超声红外热像技术中亟待解决的关键问题。

笔者以某型装甲装备底板裂纹为对象, 在研究热传导理论的基础上结合数学形态学、图像分割、骨

架描述法等数字图像处理技术, 初步探索了裂纹识别、重构的方法和思路, 为超声红外热像技术在装甲装备上的应用提供了理论指导。

1 热传导模型及有限元分析

对于均匀的、各向同性的平板试件, 厚度为 δ , 长度为 $2L$, 其边缘上有一长闭合裂纹, 试件和裂纹尺寸如图 1 所示。为探讨其在超声激励下裂纹摩擦

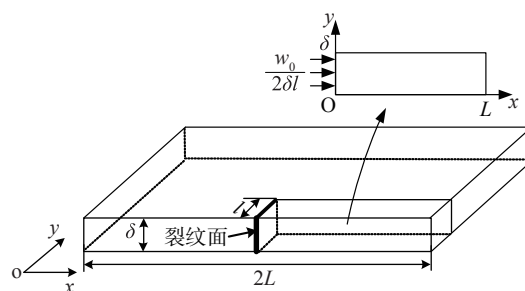


图1 试件裂纹面等效面热源

收稿日期: 2011-05-13

作者简介: 冯辅周(1971—), 男, 教授, 主要从事故障诊断和状态监测等研究。

生热及其热传导问题,进行以下假设:

(1) 若超声脉冲宽度为 τ_0 ,摩擦转化为热量的功率为 ω_0 且裂纹面摩擦生热均匀,则其相当于在裂纹面上施加时间为 τ_0 ,热流密度为 $\frac{\omega_0}{\delta l}$ 的面热源。

(2) 在裂纹长 l 较大时,忽略热量向裂纹切线方向(y 方向)的传导,考虑试件的对称性,可进一步将模型简化为施加时间为 τ_0 ,热流密度大小为 $\frac{\omega_0}{2\delta l}$ 的面热源。

(3) 在不考虑试件与环境的对流和辐射时,温度误差 $\Delta T < 3\%$ ^[2],因此忽略表面对流和辐射,并设试样有均匀的初始温度 T_0 。

试件的热传导系数为 k ,比热容为 C ,密度为 ρ 。针对上述物理模型,建立了相应的有限元分析模型,主要参数为: $\tau_0 = 2$ s, $\omega_0 = 40$ W, $\delta = 10$ mm, $L = 100$ mm, $l = 20$ mm, $k = 50$ m² · K, $C = 480$ J/kg · K, $\rho = 7\ 850$ kg/m³。初始温度 T_0 设为 20 °C,求解时间为 3 s,加载热流载荷 $\frac{\omega_0}{2\delta l}$,然后求解。

按照与裂纹位置由近到远的顺序分别取节点号为 1 332, 1 333, 1 334, 1 335, 1 336 和 1 337 的 6 个节点,得到节点温度随时间的变化曲线,如图 2 所示。对比分析各节点温度曲线,可以得出如下结论:

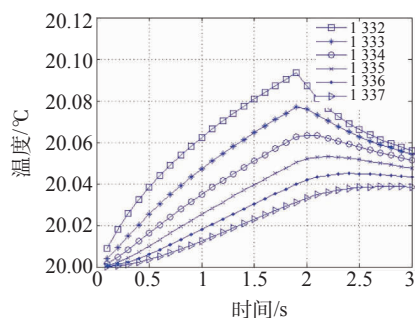


图2 裂纹区域节点温度变化

(1) 选择距离裂纹面位置 x 为某一固定值的节点,当 $0 < t \leq \tau_0$ 时,温度 T 随时间的增大而增大;当 $t > \tau_0$ 时,温度 T 随时间的增大而减小。从而推出,若选择的某个区域包含裂纹,则区域内温度均值变化应满足上述规律。这是裂纹区域温度随时间变化的基本规律,作为裂纹信息识别的判别依据。

(2) 在同一时刻,温度 T 随着距离 x 的增大而减小。对介质均匀的试件,距离 x 相同的任意两点,其温度 T 大小相同。这是裂纹区域温度空间分布的基本规律,作为裂纹形状重构的理论依据。

2 图像处理方法

超声红外图像处理主要包含数据预处理、裂纹信息识别和裂纹形状重构。其一般过程为:首先对热像仪的数据序列进行预处理;其次选定序列中的特定图像进行图像分割,并将图像分割的结果应用于所有的序列;然后将各分割区域内灰度(温度)均值的变化规律与裂纹区域温度随时间的变化规律进行匹配,完成裂纹信息的识别;最后对含裂纹区域进行裂纹形状的重构。

2.1 数据预处理

通常,红外热像仪得到的数据为温度数据序列,为便于以图像方式显示和处理,必须将温度数据序列转换为灰度图像序列;然后选定激励开始时刻的图像为初始图像,将后续灰度图像减去初始图像,以剔除不变的灰度信息,获得变化的灰度信息,该过程称为减背景。文章定义上述过程为数据预处理,经过预处理的数据可用于后续的裂纹识别和重构。

2.2 裂纹信息识别

裂纹信息识别是在序列图像的基础上进行的,需要计算序列中每帧图像相同分割区域内灰度(温度)变化信息。因此,裂纹信息识别的首要任务是得到正确的分割区域。

数据预处理后,从中选取激励结束时刻的图像作为基准分割图像。基准分割图像灰度值往往比较小,图像整体比较暗,细节不清晰。为了获得细节较为清晰的图像,对图像进行对比度线性拉伸。超声红外热像技术中,检测对象在大功率超声作用下会发生“颤动”,减背景信号存在干扰信号和边缘信号^[3],对图像进行开运算降噪,可去除干扰信号和边缘信号。红外热图像易受噪声干扰,噪声信号常常导致过分割^[4]。为提高超声红外图像分割的精确性,防止过分割现象的发生,文章采用基于控制标记符的分水岭分割算法,取得了良好的分割效果。将分割区域应用于序列图像中,提取每帧图像分割区域的灰度(温度)均值。如果某个分割区域的灰度(温度)均值随时间的变化满足裂纹区域的温度变化规律,则该区域被标记为裂纹区域。对所有分割区域进行搜索和匹配,最终实现裂纹信息识别。图 3 为裂纹信息识别的图像处理流程。

2.3 裂纹形状重构

裂纹形状对裂纹类型和裂纹扩展程度的判断非常重要,李大鹏等人在研究裂纹热特征的基础上,提

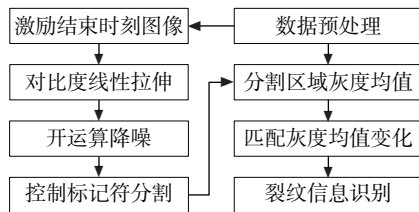


图3 裂纹信息识别

出了一套裂纹特征提取和图形重建算法^[5],但裂纹重构的精度不高。文章首次尝试采用骨架描述法来骨骼化裂纹区域以完成裂纹形状的重构。

Blum 将骨架描述法作如下定义^[6]:将图像边界上所有边界点同时点燃,火焰以相同速度向图像内部蔓延,当波前相遇时火焰熄灭,火焰熄灭处所有点的集合就构成了中轴,即骨架。采用骨架描述法对图像进行处理的过程称为骨骼化。结合上述定义和裂纹区域温度的空间分布规律,将骨骼化用来对裂纹形状进行重构,试验证明裂纹重构形状与裂纹实际形状高度吻合。

图4为裂纹形状重构的处理过程。首先从预处理后的数据序列中选取激励结束时刻图像,进行二值化阈值分割;其次采用开运算降噪的方法去除尺寸小于开运算掩膜大小的噪声影响;然后骨骼化裂纹区域并剔除毛刺,得到裂纹形状的重构结果。

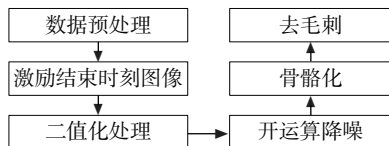


图4 裂纹形状重构

进一步,将得到的结果与初始图像(或相应可见光图像)进行融合,可以实现裂纹在初始图像(或相应可见光图像)上的定位。

3 图像处理过程

为进行算法验证,下面对试验过程中取得的一组红外图像数据进行分析。试验的对象是某型装甲车辆的底板,上有一肉眼可见微裂纹。采取超声激励裂纹附近区域,使裂纹产生摩擦生热,通过热像仪获取裂纹附近区域表面温度分布。图5和6分别为激励初始时刻和结束时刻的红外热像图。仔细对比图5和6可以发现标记区域内存在一条变亮的“线”,这就是对应的裂纹信息,显然裂纹信息相对于整幅图像并不明显,因此原始图像不利于裂纹信息的识别和形状的重构。

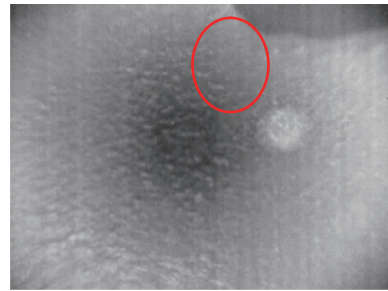


图5 激励初始时刻红外热像图

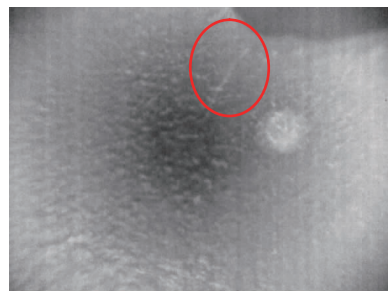


图6 激励结束时刻红外热像图

为了完成裂纹信息的识别及对裂纹形状的重构,对采集到的热图像序列进行如下处理:

首先对采集的数据进行预处理,从减背景图像序列中选取激励结束时刻图像,对图像进行亮度变换和开运算降噪,并采用基于控制标记符的分水岭分割算法对降噪后的图像进行分割,分割结果如图7所示。其次提取分割区域的灰度(温度)均值随时间的变化规律。图8为图7所示分割结果对应的序列温度变化曲线。靠上的三条温度变化曲线满足裂纹区域温度随时间变化的规律,因此对应区域标记为裂纹区域;靠下的一条温度变化曲线在 0°C 附近变化不大,代表了背景区域的温度均值变化。最后从预处理后的数据序列中选取激励结束时刻红外热像图,用一定阈值二值化分割图像,然后进行开运算降噪;对裂纹区域进行骨骼化,并剔除毛刺得到了裂纹重构的效果;进一步,将裂纹重构后的图像融合在

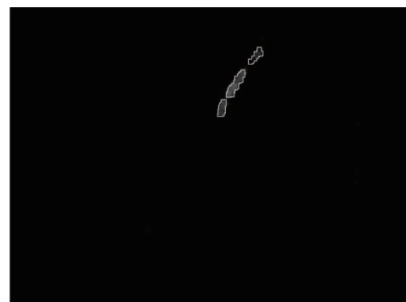


图7 分割区域

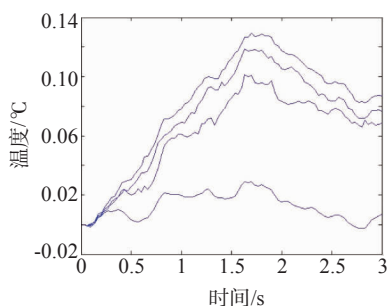


图8 分割区域的温度曲线

原始图像上,实现了裂纹的定位,裂纹形状重构并定位的结果如图9所示。

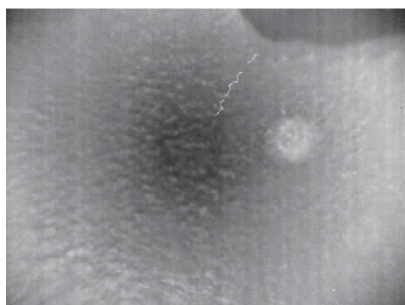


图9 裂纹形状重构及定位

与裂纹实际信息进行比照,上述裂纹识别、形状重构算法取得的效果非常理想,其形状和位置与原裂纹信息高度吻合。

4 结语

文章从建立裂纹摩擦生热的一维传热模型入手,提出了相应的裂纹识别和重构算法并用试验结果进行验证,主要工作和创新有以下几个方面:

(1) 提出了超声激励下裂纹热量传导的一维传热模型并建立了相应的有限元分析模型。依据该传热模型和有限元分析结果,开发了裂纹信息识别与

(上接第16页)

质,容易实现标准化,是国内外标准优先推荐的方法,但测试技术复杂,需要专门的计算方法和软件。

4 结语

空间分辨力是工业CT系统的重要性能参数,其测试结果既受试件特性(材料、尺寸等)影响,也受扫描工艺参数(如试件位置、重建范围等)影响,更受测试方法和评价时的调制度条件影响。因此,进行空间分辨力测试时,给出测试方法和测试条件十分重要。研究表明,空间分辨力直接测试方法的测试

裂纹形状重构的相关算法。

(2) 红外热图像易受噪声干扰,采用基于控制标记符的分水岭分割算法,改善了裂纹信息识别中图像分割的效果,提高了裂纹信息识别的准确率。

(3) 首次将骨架描述法应用于裂纹形状的重构,重构的裂纹形状与裂纹实际形状高度吻合。

文章以某型装甲装备底板裂纹为研究对象,结合热传导理论及有限元分析的结论,运用形态学降噪和基于控制标记符的分水岭分割方法完成裂纹信息的识别,采用骨架描述法对裂纹形状进行重构。文章涵盖了与超声红外热像技术相关的基础理论和图像处理流程,对超声红外热像技术中裂纹的识别和重构及其在装甲装备底板裂纹检测上的实现进行了探索。

参考文献:

- [1] Shepard Tasdiq, Ahmed Steven M, Lhota James R. Experimental considerations in vibrothermography[C]. Thermosense XXVI, USA, Orlando, 2004.
- [2] Vavilov V P. Infrared non-destructive testing of bonded structure[J]. British Journal of NDT, 1980, 22(6): 175-183.
- [3] 郑凯, 张淑仪, 蔡士杰. 超声激发下裂纹红外信号的识别[J]. 无损检测, 2008, 30(10): 757-759.
- [4] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E, Eddins Steven L. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 李大鹏, 张利群, 赵岩松. 红外无损检测中的裂纹特征提取和图形重建方法[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(7): 624-626.
- [6] Blum H. A transformation for extracting new descriptors of shape[C]. Models for the Perception of Speech and Visual Forms. Amsterdam: MIT Press, 1967.

结果要明显高于间接测试方法(圆盘法)测试结果,针对具体设备,可以建立两种测试方法的等效关系。考虑到间接测试方法标准试件制作简单,便于统一,成本低,建议优先选用。

参考文献:

- [1] GJB 5312—2004 工业射线层析成像(CT)检测[S].
- [2] ASTM E 1695—1995 Standard Test Method for Measurement of CT System Performance[S].
- [3] GJB 5311—2004 工业CT系统性能测试方法[S].
- [4] 张朝宗, 郭志平, 等. 工业CT技术和原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 51-67.