

固体药柱超声波特征扫描系统研制

Development of Ultrasonic Feature Scan Imaging System for Solid Propellant

南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 陆铭慧
清华大学机械工程系 王海芳 陈以方

[摘要] 对固体火箭发动机药柱的超声检测方法进行了研究,介绍了超声特征扫描成像原理及缺陷检测方法,研制了药柱超声波特征扫描系统,并用低频组合探头对药柱进行了检测。试验表明,设计的超声特征扫描系统可采用幅度成像、深度成像方法显示药柱的缺陷。

关键词: 固体药柱 超声检测 特征扫描成像系统

[ABSTRACT] An ultrasonic testing method for solid propellant of rocket engine is studied. The principle of ultrasonic feature scan imaging and the method of defect testing are presented. The ultrasonic feature scan imaging system for solid propellant is developed and the solid propellant is tested by using low-frequency combined transducers. The experiment shows that the ultrasonic feature scan imaging system can demonstrate the defects of solid propellant successfully by adopting amplitude imaging and depth imaging.

Keywords: Solid propellant Ultrasonic testing Feature scan imaging system

固体火箭发动机中使用的药柱在制造过程中容易出现不均匀、裂纹、空洞、脱粘、夹杂等缺陷,严重影响固体发动机的使用安全,甚至导致发动机乃至整个导弹爆炸。因而无损检测对于评价药柱的内部质量,保证药柱在加工和使用过程中的安全和可靠性有着十分重要的意义。目前国内外用于药柱的无损检测方法很多,如超声、微波、红外、激光全息、声全息、X射线照相、工业CT等,并各具特点^[1]。超声检测方法可分为穿透法和反射法,穿透法检测优点为穿透性强,几乎不存在盲区,对缺陷取向要求低,传播距离长;缺点为对小缺陷灵敏度低,不能对缺陷定位。反射法检测优点为灵敏度高,缺陷定位精度高;缺点为对表面和近表面缺陷的检测能力差。

特征扫描检测是一种提取超声信号特征进行成像的方法,即利用计算机全波列采集检测信号,提取和存

储信号的多种特征,经信号处理后按多种特征进行成像显示,利用这种检测技术可较好地检测和评价复合材料的质量。本课题研制了超声波特征扫描检测系统,并根据黏弹性介质的声传播特性,采用一发一收反射法检测药柱质量,得出了药柱的特征显示图像。

1 药柱声传播特性和检测方法

固体火箭复合推进剂是以高分子化合物粘合剂为弹性基体,内掺无机氧化剂、金属燃烧剂和其他附加成分,经机械混合后,浇铸或压延成具有一定几何形状和力学性能的固体药柱。这种高分子聚合物力学性能表现为黏弹性,即呈现弹性和黏性2种不同机理的形变,且由于声波在其中传播时产生的变形很小,因此可以认为是线黏弹性体^[2]。通过分析黏弹性介质中的声波传播特性^[3],可知低频声波传播时衰减小,在对黏弹性介质进行超声检测时,应采用低频超声。经测定,药柱的纵波声速约为2 000m/s,药柱成分不同,声速略有差别。

超声波在药柱中传播时产生严重的散射和衰减。为了减少衰减,一般采用穿透法,但这种方法的缺点是对小缺陷灵敏度低,不能对缺陷定位。反射法检测灵敏度高,缺陷定位精度高,故本研究采用超声反射法。利用特殊的低频换能器,减少声波传播时产生严重的散射和衰减;采用一发一收反射法,超声波探头由发射和接收2个独立的探头组成探头组,成一定角度放置于药柱的上面,采用水为耦合剂;发射声波沿药柱的径向传播,接收探头接收经缺陷反射的超声波;如果药柱内部没有缺陷,接收探头只能接收到经药柱内孔壁反射的超声波(底波);当有缺陷存在时,底波幅度会有一定的衰减,甚至无法找到缺陷波时,可通过底波的幅值判断缺陷的存在。

2 特征扫描成像设备的研制

2.1 超声特征扫描成像检测方法

由于药柱具有特殊的声学特性,采用一般的检测成像方法有困难。本研究采用特征扫描成像的方法来

提高缺陷判断能力。

特征扫描(Feature Scan,或称F显示)成像技术是上世纪80年代才发展起来的新技术,该方法最早由美国空军工程中心于1980年提出并获得应用^[4],主要用于复合材料的检测与评价^[5]。特征扫描包括2方面:一是超声波波形的特征,主要指超声波波形上升时间、下降时间、脉冲周期和频谱特性等;二是缺陷的特征,包括缺陷的类型、形状、大小等。特征扫描的特点是检测结果定量化,全部记录和存储检测信息,检测结果具有可识别性和复现性。

特征扫描集成了B、C显示的优点和功能,其检测能力远远超过B、C显示,除了传统显示功能外,还能对检测信号进行频谱分析和数字滤波;通过对各种特征量的提取和重构,可进行超声层析等;所有检测信息都能自动存储在计算机中,以供详细分析和复查。

2.2 系统组成及功能

特征扫描技术的关键是对待测工件缺陷特征的研究、提取和确定。需要专用换能器提取检测时的波形信息,进行检测信号的全波列采集,并存储在计算机里,通过计算机完成信号处理,并以图像方式显示各种特征参量。特征扫描成像系统组成如图1所示,同步逻辑电路控制超声发射接收电路以保证超声信号的触发、采集与机械运动同步,超声发射接收电路激励并接收专用超声换能器的信号,经过滤波、程控放大后进入高速数据采集卡进行全波列采集,采集信号经过处理后送入计算机存储,信号处理方法见图2,最后由超声成像软件成像,整个系统由计算机统一管理。

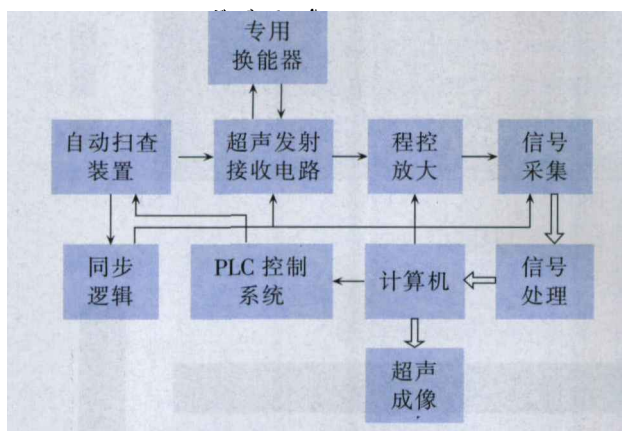
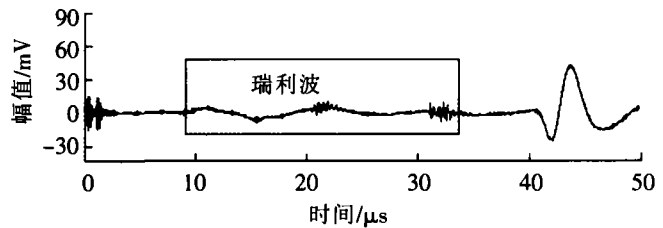


图1 特征扫描成像系统框图

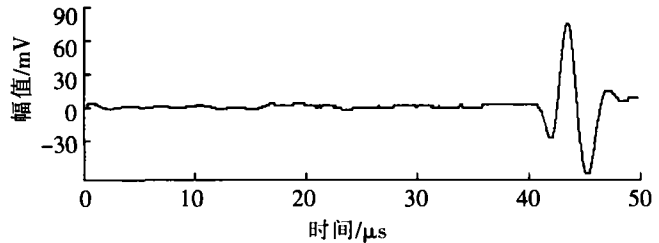
Fig.1 Block diagram of feature scan imaging system

2.2.1 硬件系统

为保证超声波探伤自动化、缺陷精确定位、探伤的



(a)药柱检测原始波形



(b)数字滤波及深度补偿后波形

图2 数字信号处理方法

Fig.2 Digital signal processing method

重复可靠性,系统硬件的设计至关重要。系统硬件由不锈钢水箱、机械伺服系统、电气控制系统、超声探伤系统等部分组成。

机械伺服系统主要完成驱动药柱旋转、探头平移以及调整探头位置等功能。整个系统使用3台交流伺服电机,以保证对药柱的整体扫查。药柱放在滚轮(包括主动轮和从动轮)上,主轴伺服电机通过齿轮链条传动驱动主动轮,主动轮带动药柱旋转,在探头保持不动的情况下完成周向的扫查。探头的平移和位置的上下调整由伺服电机来完成,可达到精确的位置控制。探头的平移完成药柱轴向的扫查,连同药柱的旋转完成对整个药柱体的扫查。

电气控制系统包括电源、上位机(工控机)、下位机(PLC)及外围电路、旋转编码器等部分,完成伺服电机控制、耦合水泵控制、强电弱电转换及触发脉冲控制等功能。3台交流伺服电机都采用方向+脉冲串的位置控制方式,外围电路将下位机输出的开关信号转换为电平信号作为方向电平,并将下位机输出的高速开关信号转换为脉冲串完成对伺服电机的位置控制。下位机通过中间继电器完成对水泵的控制。由于采用的是脉冲式超声波探伤,为了保证超声波发射和采集的同步性,超声发射系统采用外触发工作模式。系统扫查时,药柱旋转带动安装在药柱一端的旋转编码器旋转,编码器的脉冲经外围电路分频并调整脉冲宽度后作为超声发射和采集卡的触发脉冲。采用旋转编码器保证了

成像的位置对应,下位机控制编码器脉冲的分频数。

超声探伤系统完成超声发射、接收、放大、采集等功能。系统由探头、发射接收电路、放大滤波电路、程控放大及数据采集卡等组成。由于药柱声衰减非常大,商用探头无法满足需要,为此制作了带宽较大的低频探头,频率不超过 1MHz。

2.2.2 软件系统

软件采用 Microsoft 公司 VC++ 和 NI 公司 Lab Window 混合编写而成,完成机械扫查自动控制、超声信号数据采集及数字信号处理、缺陷成像、检测报告打印等功能,由人机交互界面模块、机械扫查控制模块、超声信号数据采集及数字信号处理模块、波形处理及参数调整模块、特征成像显示模块和图像处理及缺陷判定模块组成。

除机械扫查控制模块外,其他模块都采用 VC++ 编写。但在进行复杂的数字信号处理时,利用 VC++ 进行算法的编写过于复杂,远没有调用 Lab Window 提供的数字信号处理动态链接库方便、快捷。因此,利用 Lab Window/CVI 编写机械扫查控制模块,利用 Lab Window 提供串口操作函数完成上位机与下位机通信程序的编写,并编译成动态链接库(DLL)供主程序调用。采用 VC++ 和 Lab Window 混合编程,充分利用各自的优势和特点,缩短开发周期,提高效率。

特征扫描成像系统实现了固体火箭发动机药柱超声检测的自动化、数字化、图像化。通过上位机与下位机的外部通信,实现了所有动作的软界面控制,从而实现超声探伤自动化;在自动检测过程中,能够实时记录检测数据并对数据进行处理,根据波形特征自动生成检测图像,检测后自动保存检测数据,并直接生成打印报告;系统可对波形、检测图像进行后处理;用图像形式表征缺陷的位置、形状及大小(当量),完成药柱的定量化检测。

3 药柱的特征扫描检测

研制的特征扫描成像系统可对多种结构的药柱进行检测,如一般结构的药柱、星孔药柱和带包覆层星孔药柱

的检测。这里以带包覆层的星孔药柱为例,显示特征扫描检测结果。

超声检测带包覆层的药柱时,由于包覆层的结构特点,声能很难进入到包覆层下的药体,因此以前大多只能对包覆层进行检测。现在采用了合适的探测频率,既能检测包覆层质量,又能检测药柱质量。图 3 所示为包覆层星孔药柱的检测结果,药柱直径为 120mm,长度为 1 440mm,表面有 3mm 厚的包覆层,对柱体进行声波幅值和深度成像。图 3(a)中左边是幅值成像图,右边为表示幅值大小的色标,幅值成像图表明声波透过包覆层入射到柱体,产生稳定的底面反射波。药柱中存在缺陷时可使底波幅度有较明显的降低,观察图 3(a)可确定药柱中存在一个缺陷,但在图中却出现 2 次缺陷波,这是由于缺陷会 2 次出现在声传播的路径上,实际缺陷为裂纹。图 3(b)为深度成像图,深度像图实质上是底波位置图和缺陷位置图,也就是把超过阈值的声波所对应的深度标注在图中,因而深度成像图表示出了药柱内部的结构。图 3(c)是图 3(b)中某一点的 B 显示图,可清楚表明 2 个截面上(轴向和径向)的底

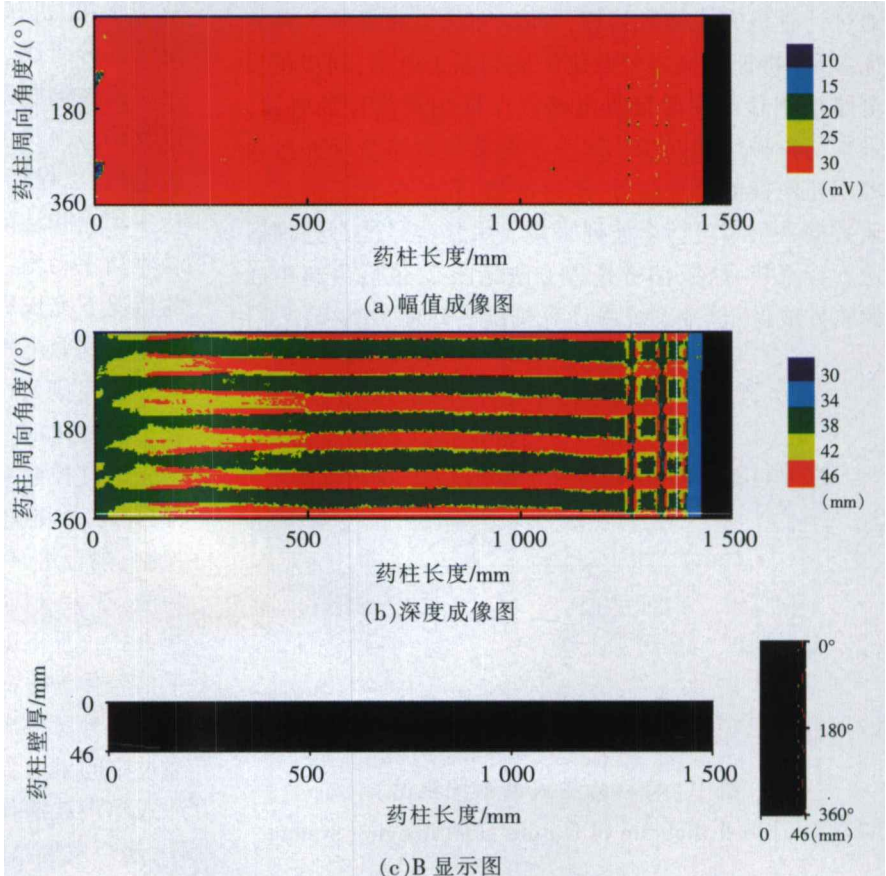


图 3 带包覆层药柱的检测结果

Fig.3 Testing results of solid propellant with inhibitor

波位置分布。

为了进一步说明带包覆层星孔药柱的结构特点,利用扫描成像系统提供的层析分析功能,对药柱进行层析。计算机层析成像是用计算机再现被检验对象的层析面或片的图形。特征扫描系统提供的是超声反射层析图,取不同深度层 H 的声场信息,利用反射信号的振幅和渡越时间能够精确地判断出不连续性或材料界面的大小和位置,对于缺陷类型的识别,需要由外及

里地分析各层的检测信号。层析成像的方法是:先选择层析的范围,然后调整幅度闸门的高度,声波幅值超过闸门的点用红色标在成像图中,低于阈值的用其他颜色标注,见图 3(a)。图 4 所示为 0~49mm 范围内的幅度成像层析图,阈值为 30mV,表明药柱自外表面向下 34mm 内没有超过阈值的反射波,星孔结构位于 34~49mm 范围内,并且在药柱的一端星孔结构消失,缺陷出现在星孔处。

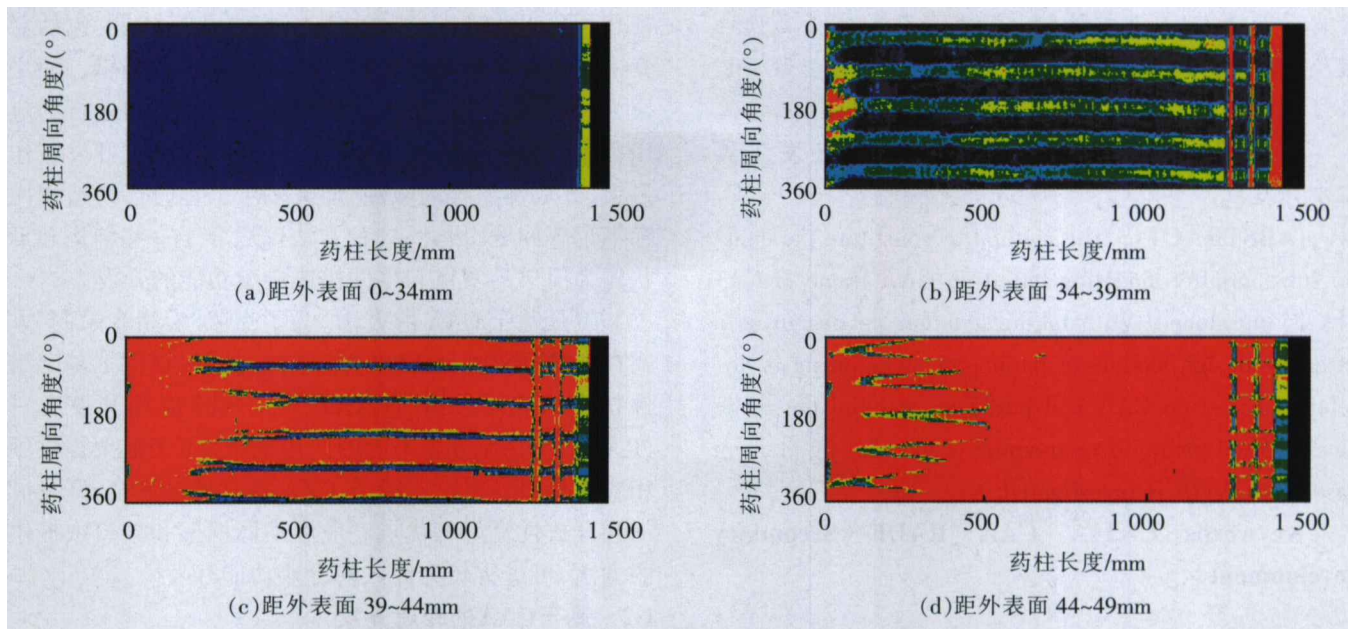


图 4 包覆层药柱的层析成像

Fig.4 CT imaging of solid propellant with inhibitor

4 结束语

本课题设计完成了特征扫描成像系统,并使用这套设备对多种结构的药柱进行了扫描成像,检测结果表明,特征扫描成像检测方法可提高超声检测药柱的可靠性,可对检测结果进行多种形式的显示,系统软件还提供了频谱分析及层析成像的功能。制作的系统已用于某企业药柱的日常检测。

参 考 文 献

- [1] 隋玉堂,杨兴根. 火箭发动机界面脱粘分析及检测新方法. 飞航导弹,2001,1:43-48.
- [2] 杨挺青,罗文波,徐平. 黏弹性理论与应用. 北京:科学出版社,2004:1-11.
- [3] 考尔斯基 H. 固体中的应力波. 北京:科学出版社,1958:104-109.
- [4] Barcohen Y, Crane R L. Acoustic-backscattering imaging of subcritical defects in composites. Materials Evaluation,

1982, 40(9):970.

- [5] Teagle P R. The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components. Composites, 1983, 14(4):115.

(责编 钟元)

(上接第 75 页)

路得到了验证,可以对今后类似产品的研制提供了一定的借鉴。

参 考 文 献

- [1] 叶尚辉,李在贵. 天线结构设计. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986.
- [2] 上海市大专院校机械制造工艺协作组. 机械制造工艺学.福州:福建科学技术出版社,1995.
- [3] 张冲,汪方宝,朱春临. 基于 VERICUT 的虚拟制造技术.合肥工业大学学报,2004,27(1):109-112.
- [4] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册,焊接分册. 北京:航空工业出版社,1996. (责编 根山 依然)

2008 年第 1 期·航空制造技术 79