

文章编号:1006-9941(2024)04-0353-07

## PBX 内部裂纹水浸超声全聚焦成像方法研究

甘仁杰<sup>1,2</sup>, 禹利达<sup>1,3</sup>, 李海宁<sup>1</sup>, 张伟斌<sup>1</sup>, 李卫彬<sup>2</sup>, 杨占锋<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 3. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 高聚物粘结炸药(PBX)的内部裂纹检测对其使用安全性和结构完整性评价具有重要意义和工程应用价值。为了提高PBX内部裂纹缺陷的成像检测精度和图像质量,研究了曲面修正水浸超声全聚焦成像方法,并在此基础上进一步结合了延迟乘和波束形成(DMAS)技术,通过水浸法对 $\Phi 100.0$  mm的半圆柱PBX的底部裂纹缺陷进行了超声成像检测研究,实现了对曲面构形PBX底部裂纹缺陷的高精度成像表征。实验结果表明,传统全聚焦成像算法的裂纹缺陷高度测量误差为12.0%,图像信噪比为1.37 dB;曲面修正后的裂纹缺陷高度测量误差为3.6%,图像信噪比为2.13 dB;而曲面修正结合DMAS算法成像的裂纹缺陷高度测量误差仅为0.4%,图像信噪比为5.32 dB。

**关键词:** 高聚物粘结炸药(PBX);曲面修正成像算法;延迟乘和波束形成(DMAS)技术;裂纹

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2023198

## 0 引言

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是由炸药晶体和高聚物粘结剂等组成的一种多相非均质复合材料,因其具有显著的力学性能和较高的安全性能而广泛应用于国防军事、航空航天等领域<sup>[1-2]</sup>。然而PBX属于脆性材料,使其在制造、加工成型、运输存储以及投入使用等各个环节均有可能产生微小裂纹并在外力的作用下逐渐扩展成为宏观裂纹从而影响含能材料的承载性能甚至引发安全事故<sup>[3-4]</sup>。因此,建立高效精确的PBX内部裂纹检测与成像方法,对深入研究和评估PBX的安全性、可靠性及结构完整性具有重要的价值。

收稿日期:2023-09-12;修回日期:2023-11-06

网络出版日期:2023-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11974295),国家自然科学基金青年科学基金项目(52105566),中国工程物理研究院创新发展基金(CX20210003)

作者简介:甘仁杰(2000-),男,硕士在读,主要从事超声相控阵全聚焦成像算法研究。e-mail:1525958721@qq.com

通信联系人:李卫彬(1982-),男,教授,主要从事超声无损检测研究。e-mail:lwbwave@163.com

杨占锋(1977-),男,副研究员,主要从事无损表征与评价研究。e-mail:zfyang22@163.com

引用本文:甘仁杰,禹利达,李海宁,等. PBX内部裂纹水浸超声全聚焦成像方法研究[J]. 含能材料,2024,32(4):353-359.

Gan Ren-jie, YU Li-da, LI Hai-ning, et al. Water Immersion Ultrasonic Total Focusing Method for Internal Cracks in PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(4):353-359.

目前应用于PBX内部裂纹检测的方法主要有CT技术<sup>[5]</sup>、X射线技术<sup>[6]</sup>和超声检测技术等。CT技术能够对裂纹进行精细识别并提取出多种形态的裂纹信息进行三维成像,但难以分辨大试件内微间隙裂纹,使CT图像中微小的密度变化特征不明显,难以判断裂纹是否存在。X射线技术可以无损透视样品内部结构并能够精确定量如气孔、夹杂等体积型缺陷,但局限之处在于对裂纹这类面积型的缺陷检测不够敏感,当射线束方向与裂纹方向平行时效果才好。相比之下,超声检测技术针对裂纹检测具有灵敏度高,检测误差小等优势,因此在炸药材料中的检测应用较为广泛。李萌等<sup>[7]</sup>为探究裂纹的形态和分布对双曲面PBX构件中超声传播特殊性的影响,分析了表面瞬态位移激励下曲面PBX构件内部的声场传播规律。杨占锋等<sup>[8-9]</sup>利用非线性超声测试装置对PBX圆柱形试样进行了测试。发现内部存在明显界面损伤的TATB基PBX试样的非线性超声系数明显偏高,当试样在出现宏观裂纹时达到极值。以上研究方法存在对裂纹缺陷显示不直观,且很难从接收的信号上判断缺陷大小等问题。而超声相控阵全聚焦成像<sup>[10-11]</sup>(Total Focusing Method, TFM)算法可以实现PBX内部裂纹的成像以及定量评价。但是曲面PBX构件由于其表面弯曲的原因,使得

传统的TFM难以准确还原超声信号在PBX内部的传播机制,且PBX属于强衰减材料,导致缺陷回波信噪比较低,影响成像质量。李海宁等<sup>[12]</sup>提出一种基于柔性相控阵的基带非线性合成聚焦成像算法,实现了曲面PBX的内部缺陷的高信噪比成像。然而,到目前为止还未有基于刚性超声换能器的双层传播介质全聚焦成像方法应用于曲面PBX材料检测的相关研究报道。

为解决曲面PBX构件内部裂纹缺陷的高精度成像和定量评价问题,通过水浸法并采用刚性阵列超声换能器进行实验,将曲面修正方法引入全聚焦成像算法中,根据PBX构件的曲面特征对信号的飞行时间进行了曲面延时修正,从而实现内部裂纹缺陷的图像重构。并在曲面修正的基础上融合DMAS算法,计算了曲面修正前后以及曲面修正结合DMAS方法下的裂纹缺陷成像的信噪比,缺陷长度以及图像分辨率等参量。分析了不同方法下同一参量的变化规律,对比评价了这些方法的成像精度和裂纹缺陷检出能力。

## 1 全聚焦成像算法的建立

### 1.1 曲面修正全聚焦成像算法

曲面PBX构件全聚焦成像检测示意图如图1所示,阵元晶片激励超声波信号传播至水中并在水与被测试件的接触面处发生折射之后传播至试件内部,随后在试件内部的裂纹缺陷表面产生反射信号并在水-PBX界面处再次发生折射进入水中,最终被晶片接收。通过该工作方式来实现全矩阵捕获(Full Matrix Capture, FMC)数据的采集。全矩阵捕获数据的采集原理为:第一个阵元晶片发射超声波信号,所有阵元晶片接收反射回来的信号并存储,随后第二个阵元晶片

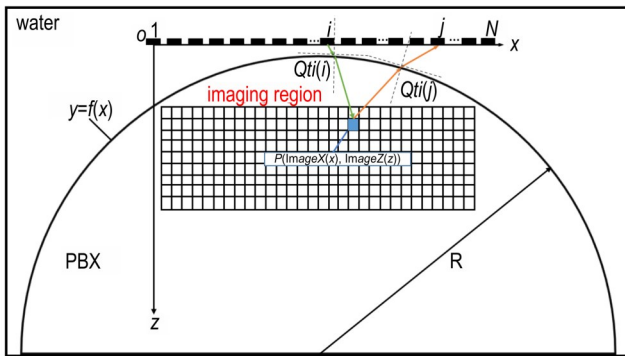


图1 曲面构件全聚焦成像原理图(水浸法)

Fig.1 Principle diagram for full-focus imaging of curved surface PBX components (water immersion method)

发射超声波信号,所有阵元晶片接收,直至发射到第N个阵元晶片并得到一个数据量为 $N \times N$ 的矩阵数据集。如图1所示,在PBX全聚焦检测原理模型中,以超声换能器左端第一个换能器晶片中心作为原点建立直角坐标系。原理模型中被测试样的表面圆弧界面函数可表示为:

$$z = -\sqrt{R^2 - (x - x_o)^2} + z_o \quad (1)$$

式中, $x_o$ 、 $z_o$ 分别为半圆柱试块圆心在该直角坐标系下的横、纵坐标; $R$ 为半圆柱PBX试块的半径,mm。在全聚焦成像算法中,成像区域内某一聚焦点 $P$ 所接收到的所有超声信号幅值叠加之后可表示为:

$$I(\text{Im age}X(x), \text{Im age}Z(z)) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij}(t_{ij}(\text{Im age}X(x), \text{Im age}Z(z))) \quad (2)$$

式中, $s_{ij}$ 是全矩阵数据的希尔伯特变换,可消除激励信号振荡对成像结果的影响, $t_{ij}(\text{Im age}X(x), \text{Im age}Z(z))$ 为第 $i$ 个阵元晶片发射信号到聚焦点 $P$ ,再由点 $P$ 反射信号到第 $j$ 个阵元晶片所需要的飞行时间, $\mu\text{s}$ 。根据超声波在水中以及被测试样中的传播路径,可以得到其飞行时间为:

$$t_{ij}(\text{Im age}X(x), \text{Im age}Z(z)) = \frac{d_{i1} + d_{j1}}{c_1} + \frac{d_{i2} + d_{j2}}{c_2} \quad (3)$$

式中, $d_{i1}$ 和 $d_{j1}$ 分别为超声波在水介质中发射和接收的传播路径,mm; $d_{i2}$ 和 $d_{j2}$ 分别为超声波在PBX中发射和接收的传播路径,mm; $c_1$ 、 $c_2$ 分别为超声波在水中和PBX内部的声速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。根据斯奈尔定律和费马原理<sup>[13]</sup>可知超声波在介质中的路径为时间最短路径。结合PBX曲面构件试块的弧面函数,可以得到超声波在双层介质中的传播路径为:

$$\begin{aligned} d_{i1} &= \sqrt{(xi(i) - xti(i))^2 + (zi(i) - zti(i))^2} \\ d_{j1} &= \sqrt{(xi(j) - xti(j))^2 + (zi(j) - zti(j))^2} \\ d_{i2} &= \sqrt{(xti(i) - \text{Im age}X(x))^2 + (zti(i) - \text{Im age}Z(z))^2} \\ d_{j2} &= \sqrt{(xti(j) - \text{Im age}X(x))^2 + (zti(j) - \text{Im age}Z(z))^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $xi$ 、 $zi$ 分别为发射和接收阵元的横、纵坐标, $xti$ 、 $zti$ 分别为被检试样的圆弧表面折射点坐标, $\text{Im age}X(x)$ 、 $\text{Im age}Z(z)$ 分别为聚焦点 $P$ 的坐标。采用上述方法计算目标检测区域内所有的聚焦点的幅值并叠加,最终获得PBX试块曲面结构的全聚焦成像结果。

## 1.2 延迟乘和波束形成算法

延迟乘和波束形成(Delay Multiply and Sum, DMAS)算法最初用于雷达微波系统成像,后经过改进之后用于医学超声成像以及其他工业领域<sup>[14-15]</sup>。该算法的公式如式(5)、(6)所示:

$$s_{ij}(t) = \text{sign}(s_i(t) \cdot s_j(t)) \cdot \sqrt{|s_i(t) \cdot s_j(t)|} \quad (5)$$

$$Y_{\text{DMAS}} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_i(t) \cdot s_j(t) \quad (6)$$

式中,  $\text{sign}$  表示符号函数;  $s_i(t)$ 、 $s_j(t)$  分别表示第  $i$ 、 $j$  个阵元接收的延时信号;  $N$  表示阵元数量。

为了降低算法的复杂度<sup>[16]</sup>, 提高计算效率, 在保持相位不变的情况下对幅值进行  $p$  次根缩放, 然后对缩放后的数值进行相干求和形成新的幅值信号, 最后再对该信号取  $p$  次方恢复其维数。改进后的算法表达式如式(7)所示:

$$Y_{p\text{-DMAS}}(t) = \left( \sum_{i=1}^N \text{sign}(s_i(t)) \sqrt[p]{|s_i(t)|} \right)^p \quad (7)$$

式中, 系数  $p$  可表示为 FMC 数据中接收信号之间的信

号空间相干度, 且  $p$  不限于整数。在  $p=2$  的情况下, 波束形成信号有利于消除不期望引入的谐波成分且不失一般性<sup>[16]</sup>。

根据曲面 PBX 构件的圆弧方程和曲面修正方法, 将式(2)替换成式(7)即可实现曲面修正算法与 DMAS 算法相结合。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品预制

实验采用一维超声阵列换能器, 阵元数量  $N$  为 64, 中心频率  $f$  为 2.5 MHz, 换能器的采样频率  $f_s$  为 62.5 MHz, 换能器的中心位置位于试样正上方。如图 2 所示, 被测试样为一半圆柱 PBX 试块, 该试块由 95% 的奥克托今(HMX)晶体与 5% 的黏结剂等静压压制而成, 并通过机械加工获得试块的内外型面和底部人工预制裂纹缺陷, 试块标定声速为  $3.1 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , 试块半径 50.0 mm, 厚度为 20.0 mm。裂纹缺陷位于试块底部中心位置, 缺陷的高度为 5.0 mm, 宽度为 2.0 mm。

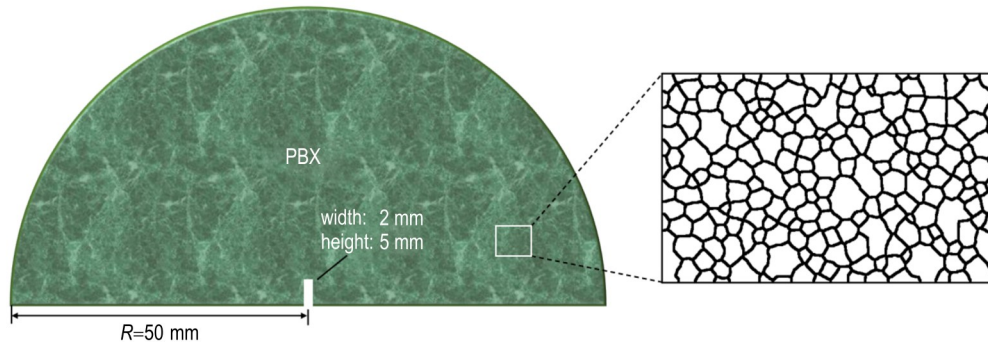


图 2 曲面 PBX 构件模型示意图

Fig.2 Surface PBX component model diagram

### 2.2 实验方法

超声相控阵全聚焦成像检测实验在一蓄水容器内进行。由于水中声速与试块声速之间存在较为明显的差距, 所以为了进行超声相控阵水浸成像, 根据斯奈尔定律和费马原理<sup>[13]</sup>来求解阵列传感器晶片界面与试块表面之间的几何关系从而确定声波在经过水层到达试块内部的传播方向变化, 在得到声波传播路径后便可计算其延时时间。实验所采用的超声成像检测系统如图 3 所示, 该系统包括一个 64 阵元的一维阵列超声换能器, 下位机 FMC 数据采集设备和 PC 上位机。实验中的核心设备是来自汕头超声的一款基于现场可编程门阵列(FPGA)的下位机, 换能器接收到的信号通过下位机采集形成 FMC 数据并上传至 PC 端。实验所

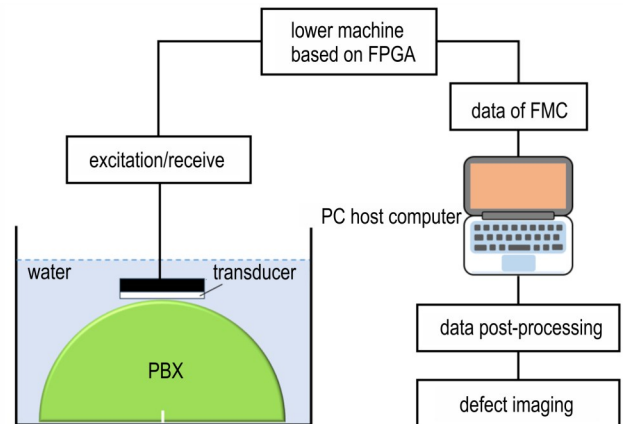


图 3 曲面 PBX 构件水浸法超声成像检测系统

Fig.3 Ultrasonic imaging detection system for surface PBX component in immersion



采集到的FMC数据将通过传统的全聚焦算法、曲面修正后的全聚焦算法以及曲面修正结合DMAS算法进行全矩阵数据后处理并最终实现不同方法下的缺陷图像重构。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 缺陷回波信号

为了方便验证测量的实际飞行时间与理论计算时间是否吻合,对FMC数据中第30个阵元自发自收的时域超声信号进行了研究,将该阵元采集到的信号进行提取并作归一化处理,其信号波形如图4所示。由图4可以看出,信号从发射至被测试件内部的裂纹顶端并衍射回去所经历的飞行时间为 $29.6\ \mu\text{s}$ ,而计算所得的理论飞行时间为 $29.0\ \mu\text{s}$ ,分析计算其误差为 $0.2\%$ ,可见基本符合该阵元晶片的超声波信号传播至裂纹缺陷顶部并衍射回去的飞行时间,说明阵元所接收到的信号中存在缺陷回波信号。图4中最右边的回波信号代表超声波从试块底部反射回去的信号。另外,从整体的波形图图4中可以看出,提取的信号中存在幅值很大的电噪声以及部分结构噪声,在对缺陷进行成像时上述信号将会导致图像背景区域出现一定的背景噪声以及在被测试件的近表面处出现严重的噪声干扰,如果在试块的表面存在缺陷的话,则在成像结果中容易掩盖其表面位置的缺陷。

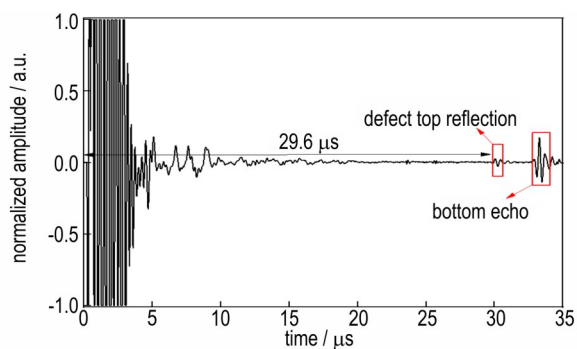


图4 第30个阵元自发自收的时域信号

Fig. 4 Time domain signals of the 30<sup>th</sup> array element's self-transmit and self-receive

#### 3.2 缺陷检测及成像结果

将采集后的FMC数据进行不同算法后处理成像,其结果如图5所示。图5a为传统TFM算法的成像结果,从图5a中可以观察到存在较大的背景噪声,而且缺陷的形状也发生了严重畸变。图5b为曲面修正后的TFM算法的成像结果,从图5b中可以清楚地反映

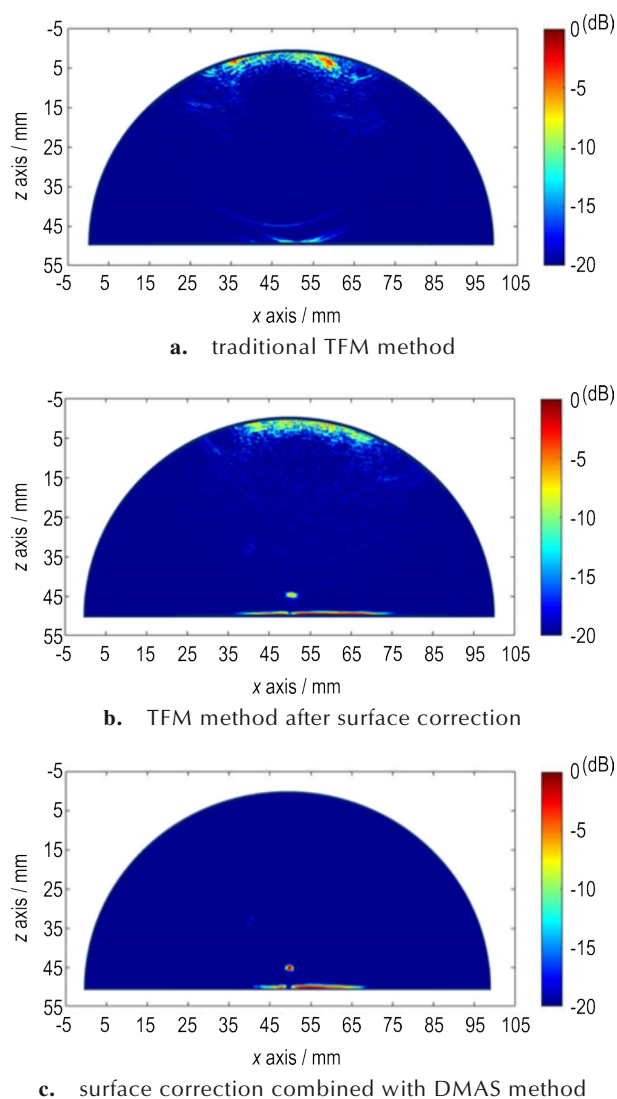


图5 不同算法下的成像结果

Fig.5 Imaging results of different algorithms

出裂纹顶端和试块底部的反射回波信号,不过图像中仍然存在部分背景噪声。而图5c是曲面修正方法和DMAS相结合之后的成像结果,从图5c中可以看出其背景噪声得到了明显的抑制,且有效地加强了裂纹尖端的反射信号强度,这是因为对全矩阵数据进行了非线性运算,增强了缺陷回波的相干信号并削弱了噪声的非相干信号。

#### 3.3 缺陷成像质量对比及定量评价

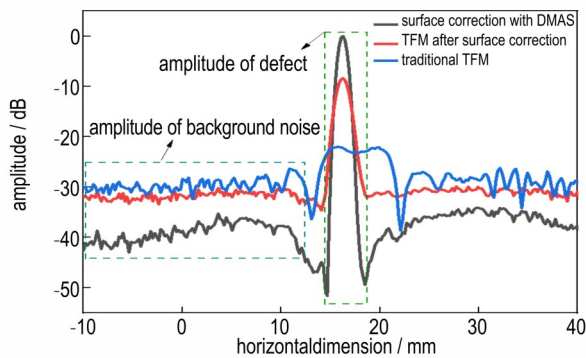
为了具体分析不同的成像算法对PBX内部裂纹的成像效果影响,如图6a所示,提取各dB值图像中试块底面缺口正上方的裂纹顶端处衍射信号的水平幅值绘制出水平幅值曲线以对比不同方法下的缺陷信号回波的横向强度。从图6a中可以直观地看出,曲面修正算法结合DMAS技术的缺陷回波幅值最大;其次是曲

面修正后的TFM算法;而传统TFM算法的回波幅值最小且难以分辨缺陷信号特征,这个结果充分说明了传统TFM算法下的裂纹缺陷成像存在畸变。另外,曲面修正后的TFM算法相对于传统TFM算法在背景噪声方面存在一定的抑制作用,而曲面修正结合DMAS算法在背景噪声抑制方面则最为明显。表1所示为不同成像方法下测得的缺陷信号回波的幅值。经过测定,不同算法下的缺陷回波信号幅值的强度分别为-22.16,-8.38 dB和0.00 dB,相比于传统TFM算法,曲面修正的TFM算法和曲面修正结合DMAS算法在缺陷回波幅值上分别提高了13.78 dB和22.16 dB。如图6b所示,提取像素点幅值图像中裂纹顶端衍射信号中心位置的横向幅值并通过-6 dB法进行dB幅值成像从而形成缺陷横向分辨率的幅值曲线图。从曲线图6b可以看出,传统TFM算法的缺陷横向分辨率最低,其次是曲面修正后的TFM算法的缺陷横向分辨率,曲面修正结合DMAS算法的缺陷横向分辨率改善程度最大。如表1所示,3种成像结果中像素点幅值在-6 dB及以上的总宽度分别是:19.90,1.80 mm和

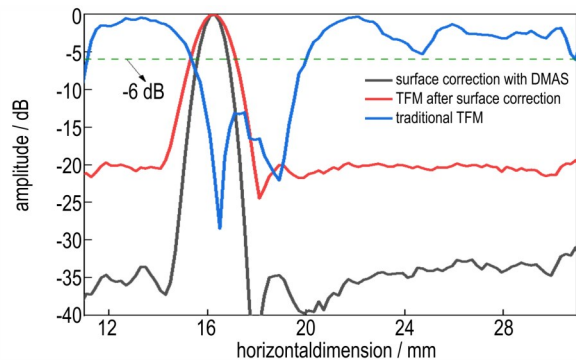
1.20 mm。曲面修正后的TFM及曲面修正结合DMAS算法的缺陷信号处的横向分辨率相较于传统TFM算法分别提高了90.9%和93.9%。显然曲面修正算法在缺陷成像质量上要明显强于传统的TFM算法,而结合了DMAS算法的曲面修正成像算法则在成像质量上也有进一步提高。

为了进一步评价曲面修正后的TFM算法和曲面修正结合DMAS算法相比于传统TFM算法在裂纹缺陷成像结果的改善程度,分别引入了信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、阵列性能指标(Array Performance Index, API)来对整体的图像质量进行评价。如表1所示,曲面修正后的图像信噪比为2.13 dB,曲面修正结合DMAS算法的图像信噪比为5.32 dB,二者相对于传统TFM算法的信噪比分别提高了0.76 dB和3.95 dB;反映整体图像分辨率的阵列性能指标在改进后的2种成像算法中分别为9.46和5.07,相对于传统TFM算法分别降低了12.86和17.25。

此外,再对3种算法成像结果图中的裂纹缺陷高度进行测量,以试块底部空缺处作为缺陷高度的一端,正上方处作为缺陷高度的另一端。其测量结果如图7所示,裂纹缺陷的实际高度为5.00 mm;传统TFM算



a. transverse amplitude curve



b. lateral resolution curve

图6 缺陷成像的横向图像质量对比曲线图

Fig.6 Lateral image quality comparative curve for defect imaging

表1 不同算法下的参数对比

Table 1 Comparison of parameters under different algorithms

imaging algorithm	A/dB	W/mm	SNR/dB	API
traditional TFM	-22.16	19.90	1.37	22.32
TFM after surface correction	-8.38	1.80	2.13	9.46
surface correction with DMAS	0.00	1.20	5.32	5.07

Note: A is amplitude. W is horizontal width. SNR is signal-to-noise ratio. API is array performance index.

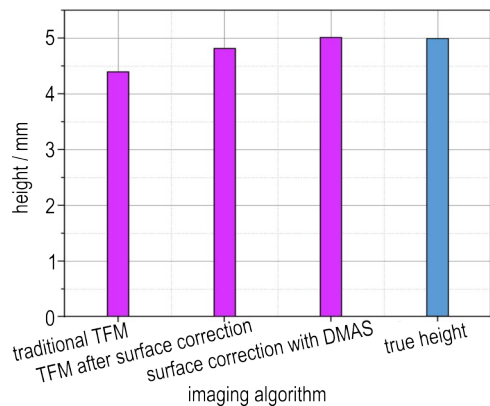


图7 不同算法下的裂纹测量结果

Fig.7 Crack measurement results of different algorithms

法成像的裂纹测量高度为 4.40 mm,与实际裂纹高度的测量误差为 12.0%;曲面修正的 TFM 算法成像的裂纹测量高度为 4.82 mm,其测量误差为 3.6%;而曲面修正结合 DMAS 算法成像的裂纹测量高度为 5.02 mm,测量误差仅为 0.4%。通过对不同算法裂纹缺陷成像质量的比较以及缺陷定量评价,可以发现,结合了 DMAS 方法的曲面修正成像算法在图像的各个性能指标及评价方面均表现出最好的效果,显著提高了缺陷的检测能力,使得缺陷显示更为直观,降低了缺陷漏检或者误检的可能性。

## 4 结论

针对曲面 PBX 构件内部裂纹的高质量成像检测问题,提出将 DMAS 算法和曲面修正 TFM 算法相结合的一种方法,使用一维阵列换能器通过水浸法对曲面 PBX 试块裂纹进行超声成像,得到了高质量的超声图像,主要研究结论包括:

(1) 针对曲面 PBX 构件内部裂纹缺陷开展了超声相控阵全聚焦成像检测研究,预制了带人工裂纹缺陷的实验样品,计算并分析了 3 种不同成像方法下的成像信噪比、图像分辨率以及阵列性能指标等参数,对比分析了不同算法对裂纹缺陷检出能力的优劣。

(2) 实验结果表明,曲面修正结合 DMAS 算法将曲面 PBX 内部裂纹缺陷的超声重构图像信噪比提升了 3.95 dB 且缺陷回波信号幅值增强的同时有效抑制了图像的背景噪声;裂纹缺陷的横向分辨率改善了 93.9%;裂纹测量高度误差为 0.4%。该算法显著改善了裂纹缺陷的检出能力,同时兼顾了成像精度。

(3) 水浸法以水为中间传播介质,相比于超声波在空气中传播大大降低了其衰减程度,而且超声波声速在水中和 PBX 试块中存在明显的声速差,因此能够有效验证改进后的成像算法的优势。

### 参考文献:

- [1] 董海山,周芬芬.高能炸药及相关物性能[M].北京:科学出版社,1989:59-61.  
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Performance of high-energy explosives and related substances[M]. Beijing: Science Press, 1989: 59-61.
- [2] FAN H, GUAN H, YANG Z, et al. Theoretical study of interface thermodynamic properties of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene based polymer bonded explosives [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 1-10.
- [3] 宗和厚,张伟斌,肖丽,等.超声端点反射法检测 PBX 表面裂纹深度[J].含能材料,2016,24(2):166-170.  
ZONG He-hou, ZHANG Wei-bin, XIAO Li, et al. Crack
- depth detection of PBX section by ultrasonic edge peak echo method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 166-170.
- [4] 裴翠祥,弋东驰,刘文文,等. PBX 内部缺陷激光超声无损检测数值模拟[J].含能材料,2017,25(10):822-828.  
PEI Cui-xiang, GE Dong-chi, LIU Wen-wen, et al. Numerical simulation of laser ultrasonic nondestructive testing of internal defects in PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(10): 822-828.
- [5] 张韬,宗和厚,陈华,等.高聚物黏结炸药 CT 图像像素级裂纹识别方法研究[J].含能材料,2020,28(5):442-448.  
ZHANG Tao, ZONG He-hou, CHEN Hua, et al. Research on pixel-level crack extraction method for CT images of polymer bonded explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(5): 442-448.
- [6] 田强,闫冠云,白亮飞,等.小角散射技术在高聚物粘结炸药中的应用研究进展[J].含能材料,2019,27(5):434-444.  
TIAN Qiang, YAN Guan-yun, BAI Liang-fei, et al. Progress in the applied research of small-angle scattering technique in polymer bonded explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(5): 434-444.
- [7] 李萌,徐尧,肖盼,等.曲面 PBX 构件内部裂纹小角度斜入射超声检测数值模拟[J].含能材料,2021,29(1):29-34.  
LI Meng, XU Yao, XIAO Pan, et al. Numerical simulation of small-angle ultrasonic testing for inner cracks in curved PBX structure [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(1): 29-34.
- [8] 杨占锋,田勇,周海强,等.非线性超声技术检测 TATB 基 PBX 微损伤[J].含能材料,2017,25(12):970-975.  
YANG Zhan-feng, TIAN Yong, ZHOU Hai-qiang, et al. Detection of micro-damages in TATB-based polymer bonded explosive by nonlinear ultrasonic technique [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(12): 970-975.
- [9] YANG Z, TIAN Y, LI W, et al. Experimental investigation of the acoustic nonlinear behavior in granular polymer bonded explosives with progressive fatigue damage [J]. *Materials*, 2017, 10(6): 660-668.
- [10] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 701-711.
- [11] 周正干,彭地,李洋,等.相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J].机械工程学报,2015,51(10):1-7.  
ZHOU Zheng-gan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 1-7.
- [12] 李海宁,禹利达,甘仁杰,等.颗粒填充复合炸药裂纹缺陷的高信噪比超声成像方法[J].物理学报,2023,72(15):113-122.  
LI Hai-ning, YU Li-da, GAN Ren-jie, et al. High SNR ultrasonic imaging of crack defects in particles filled composite explosives [J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(15): 113-122.
- [13] MATRONE G, SAVOIA A S, CALIANO G, et al. The delay multiply and sum beamforming algorithm in ultrasound b-mode medical imaging [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2015, 34(4): 940-949.
- [14] YU L, SONG Y, LI X. Ultrasonic pseudo-color imaging in strongly attenuating materials with filtered-delay multiply and

- sum nonlinear beamforming[J]. *NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 130: 130–140.
- [15] RAMALLI A, DALLAI A, BASSI L, et al. High dynamic range ultrasound imaging with real-time Filtered-Delay Multiply and sum beamforming [C]//2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2017: 6–9.
- [16] POLICHETTI M, VARRAY F, MATRONE G, et al. A computationally efficient nonlinear beamformer based on p-th root signal compression for enhanced ultrasound B-mode imaging [C]//2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2017: 1–4.

## Water Immersion Ultrasonic Total Focusing Method for Internal Cracks in PBX

Gan Ren-jie<sup>1,2</sup>, YU Li-da<sup>1,3</sup>, LI Hai-ning<sup>1</sup>, ZHANG Wei-bin<sup>1</sup>, LI Wei-bin<sup>2</sup>, YANG Zhan-feng<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The internal crack detection of polymer bonded explosive (PBX) is of great significance and engineering application value for its safety and structural integrity evaluation. In order to improve the imaging detection accuracy and image quality of PBX internal crack defects, the curved surface modified water immersion ultrasonic total focusing imaging method was proposed. On this basis, the delay multiply and sum (DMAS) technology was further combined. The ultrasonic imaging detection of the bottom crack defects of the  $\Phi 100.0$  mm semi-cylindrical PBX was studied by water immersion method, and high-precision imaging characterization and high signal-to-noise ratio imaging of this bottom crack defect of the curved PBX was realized. The experimental results show that the crack defect height measurement error of the traditional TFM imaging algorithm is 12.0%, and the image signal-to-noise ratio is 1.37 dB. The height measurement error of this crack defect after surface correction is 3.6%, and the image signal-to-noise ratio is 2.13 dB. The crack defect height measurement error of the surface correction algorithm combined with DMAS is only 0.4%, and the image signal-to-noise ratio is 5.32 dB.

**Key words:** polymer bonded explosive; surface correction imaging algorithm; delay multiply and sum technology; crack defects

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023198

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 11974295), Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 52105566) and the China Academy of Engineering Physics Foundation (No. CX20210003)

(责编:王馨逸)