

颗粒填充复合炸药裂纹缺陷的高信噪比超声成像方法*

李海宁¹⁾ 禹利达¹⁾²⁾ 甘仁杰¹⁾³⁾ 张伟斌¹⁾ 杨占锋^{1)†}

1) (中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳 621999)

2) (中南大学交通运输工程学院, 长沙 410075)

3) (厦门大学航空航天学院, 厦门 361102)

(2023 年 4 月 4 日收到; 2023 年 5 月 30 日收到修改稿)

高聚物黏结炸药 (PBX) 是一类由炸药造型颗粒高度填充和少量黏结剂构成的复合材料, 其内部裂纹的有效检出对结构完整性评价和安全可靠性评估具有重要意义. PBX 因其特殊的细观结构特征呈现出声速低、衰减强的特点, 利用传统线性超声聚焦成像时, 超声波在颗粒边界发生的多重反射会造成重构图像信噪比低, 裂纹特征淹没在背景噪声中, 难以有效识别. 为改善成像信噪比, 提出一种基带非线性合成聚焦 (BB-NSF) 超声相控阵成像算法, 充分利用全矩阵数据中各通道接收信号的空间相干性, 增强缺陷位置图像强度的同时抑制了背景噪声, 再结合 PBX 曲面构形特征对算法的延时法则进行修正, 实现了曲面构形 PBX 不同取向裂纹缺陷的高信噪比成像, 并对重构图像质量和成像效率进行了定量对比评价. 结果表明, BB-NSF 算法可有效地抑制背景噪声, 显著地改善 PBX 裂纹检出能力. BB-NSF 算法中的信号空间相干度 p 是影响图像信噪比的关键参数. p 值大于 2.0 时, PBX 裂纹缺陷超声重构图像的信噪比相比于传统的全聚焦成像算法可以提升 10 dB 以上. 随着 p 值增加, 重构图像的信噪比可以得到进一步提升, 而计算效率保持稳定, 体现出 BB-NSF 算法在强衰减复合材料内部缺陷成像方面的优势和应用前景.

关键词: 高聚物粘结炸药, 裂纹缺陷, 超声相控阵, 基带非线性合成聚焦算法

PACS: 43.20.+g, 43.25.+y, 43.35.+d, 43.35.Zc

DOI: 10.7498/aps.72.20230522

1 引言

高聚物黏结炸药 (polymer bonded explosives, PBX) 是一类由单质炸药晶体高度填充 (90% 以上) 和少量黏结剂压制而成的典型颗粒填充复合炸药, 其具备较高的力学性能和良好的加工成型性能, 被广泛应用于国内外武器装备^[1–3]. 在环境因素的作用下 PBX 可能会产生宏观裂纹, 进而导致炸药部件的力学性能退化和炸药敏感化, 影响系统安全性和可靠性^[4,5]. 因此, 建立准确有效的 PBX 内部裂纹检测与成像方法, 对于揭示 PBX 断裂力

学行为规律和评估 PBX 结构完整性至关重要.

超声相控阵检测与成像方法在裂纹缺陷的检测方面体现出独特的优势和潜力^[6,7]. 但 PBX 试件的声学测试结果表明, 该材料对超声波呈现出低声速 (约 $3000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和强衰减 (2.5 MHz 超声衰减系数约 $400 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$) 等特性, 导致缺陷回波的信噪比较低, 影响缺陷识别. 另外, PBX 构件的曲面特征, 为裂纹缺陷的高信噪比成像带来了挑战. 基于线性延时叠加 (delay and sum, DAS) 原理的全聚焦 (total focusing method, TFM) 成像算法及其衍生算法, 已被证实可实现内部裂纹缺陷的成像和定量评价^[8,9]. 例如采用矢量 TFM 来表征裂纹的方向^[10],

* 国家自然科学基金 (批准号: 52105566) 和中国工程物理研究院创新发展基金 (批准号: CX20210003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zfyang22@163.com

利用多模 TFM 来提高缺陷表征的能力^[11]. 另外, 张海燕等^[12]提出一种声束指向性函数校正的 TFM 阵列成像方法, 实现了碳纤维增强复合材料中的褶皱缺陷高信噪比成像. 但实验证明, 针对 PBX 这一类颗粒填充复合炸药的复杂构形试件, 基于 DAS 原理的信号处理算法对噪声和杂波信号的抑制效果非常有限, 不仅曲面构形会导致重构的缺陷形态发生畸变, 内部颗粒填充结构对超声波呈现的强衰减特性会导致图像中存在严重的背景噪声, 影响裂纹缺陷的识别和定量检测^[13–15].

与采用 DAS 原理的成像算法不同, 延时组合乘叠加 (delay multiply and sum, DMAS) 非线性波束形成算法利用射频接收信号的空间相干性来提高信噪比, 在噪声和杂波信号的抑制方面展现出优异性能^[16–19]. Matrone 等^[20–22]改进了 DMAS, 提出了一种滤波延时乘累加 (F-DMAS) 非线性波束形成算法, 并与合成孔径成像、平面波成像和多线传输成像等技术结合进一步提高了 DMAS 的表现性能. Luo 等^[23]将 F-DMAS 应用于楔形两层介质的超声平面波复合成像, 并对钢轨内部缺陷进行检测, 实现了缺陷的高信噪比成像. Teng 等^[24]将 F-DMAS 应用于全矩阵数据 (full matrix capture, FMC) 的后处理成像, 提高了超声相控阵检测的成像质量. Yu 等^[25]利用 F-DMAS 算法结合伪彩色成像技术对平面 PBX 材料的人工预制横通孔缺陷进行检测, 获得了高信噪比的成像结果. 基带 DMAS (baseband-DMAS, BB-DMAS) 非线性波束形成算法的提出, 避免了射频信号组合相乘造成的频谱分量混叠和高计算复杂度^[26]. 该算法通过将射频接收信号进行解调, 使用基带信号空间相干来代替

射频信号的配对相乘, 在获得高信噪比超声图像的同时, 还可以显著减少成像算法的计算负载^[27]. 这一特点使得 BB-DMAS 在颗粒填充复合炸药内部缺陷的高信噪比超声成像方面呈现出巨大的应用潜力.

针对曲面构形、颗粒填充复合炸药 PBX 的裂纹缺陷检测问题, 本文将 BB-DMAS 非线性波束形成方法与合成聚焦成像原理相结合, 提出一种基带非线性合成聚焦 (baseband-nonlinear synthetic focusing, BB-NSF) 成像算法模型, 通过全矩阵数据的空间相干性来实现对接收信号中噪声和杂波的有效抑制, 并结合检测试块的构形特征对算法的延时法则进行修正, 实现了曲面构形 PBX 内部裂纹的超声成像. 通过仿真进一步分析了柔性换能器的检测位置对不同取向 PBX 裂纹的成像结果的影响规律, 获得了信号中影响裂纹缺陷检测的关键因素, 最后对缺陷的成像质量进行了定量评价.

2 超声成像算法模型

2.1 基于 FMC 数据的 BB-NSF 成像算法

根据超声相控阵 FMC 数据采集原理, 假设一维线性相控阵换能器拥有 M 个阵元, 通过依次单独激发阵元发射超声信号, 所有阵元同时接收回波信号, 可以获得一个 $N = M \times M$ 的回波矩阵数据. 图 1 是本文提出的 BB-NSF 算法原理图, 首先使用带通滤波器和小波去噪方法对接收到的 FMC 原始信号进行处理得到 $s_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$). 再利用希尔伯特变换 (Hilbert transform) 对信号 $s_i(t)$ 进行解调, 将其分解为模量和相位分量. 根据 TFM

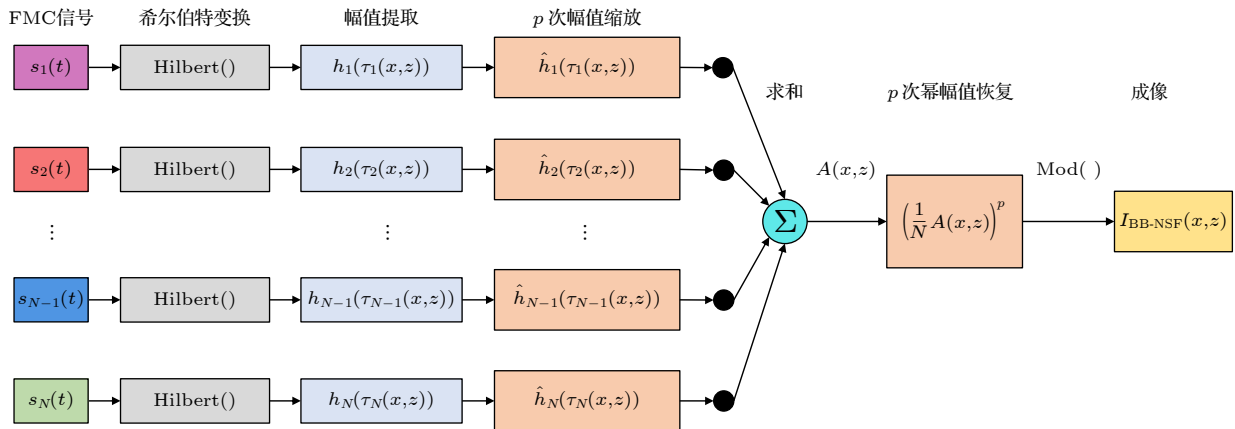


图 1 BB-NSF 算法示意图

Fig. 1. Block diagram of BB-NSF algorithm.

合成聚焦成像算法原理, 计算虚拟聚焦点 (x, z) 与发射-接收对信号的延时时间 $\tau_i(x, z)$, 并提取对应接收信号在该位置的基带信号幅值 $h_i(\tau_i(x, z))$. 在保持相位不变的情况下, 对该幅值 p 次根缩放得到 $\hat{h}_i(\tau_i(x, z))$, 然后对缩放后的数值进行求和, 获得非线性合成后的幅值 $A(x, z)$. 最后对该幅值取 p 次幂恢复信号幅值的单位得到 $\left(\frac{1}{N}A(x, z)\right)^p$, 并通过计算希尔伯特变换中两个分量的模, 可以获得最终图像虚拟聚焦点的像素强度 $I_{\text{BB-NSF}}(x, z)$.

通过希尔伯特变换, 将预处理后的时域接收信号 $s_i(t)$ 解调为同相分量和正交分量, 其模量和相位分量可表示为

$$\begin{aligned} h_i(t) &= H[s_i(t)] = I_i(t) + jQ_i(t) \\ &= X_i(t) e^{j\phi_i(t)}, \quad i \in (1, N), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换; $I_i(t)$ 和 $Q_i(t)$ 分别表示同相和正交分量; $X_i(t)$ 为希尔伯特变换中两个分量的模; $\phi_i(t)$ 为对应的相位. 如图 2 所示, 对于成像区域的聚焦点 $P(x, z)$, 超声波从第 t 个阵元发射经过聚焦点, 由第 r 个阵元接收的飞行时间可表示为

$$\begin{aligned} \tau_i(x, z) &= \frac{1}{c_L} \left[\sqrt{(x_t - x)^2 + (z_t - z)^2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(x_r - x)^2 + (z_r - z)^2} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

其中 i 表示 FMC 数据中的第 i 个接收信号; (x_t, z_t) 和 (x_r, z_r) 分别为发射阵元和接收阵元的坐标位置, 下标关系为 $r = \text{mod}(i, M)$ 和 $t = 1 + (i - r)/M$; c_L 为超声纵波在试块中的传播速度.

提取各发射-接收组飞行时间所对应的解调后信号幅值, 并采用 p 次根将其缩放为 $\hat{h}_i(\tau_i(x, z)) = \sqrt[p]{X_i(\tau_i(x, z))} e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))}$. 对缩放后的各通道幅值求和后, 进行 p 次幂恢复信号幅值的单位. 因此, 基于 FMC 数据的 BB-NSF 算法可以写成:

$$\begin{aligned} I_{\text{BB-NSF}}(x, z) &= \left| \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt[p]{X_i(\tau_i(x, z))} e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))} \right)^p \right|, \\ &\quad (p \geq 1), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $I_{\text{BB-NSF}}(x, z)$ 为 BB-NSF 算法重构图像任意像素点的强度; 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.

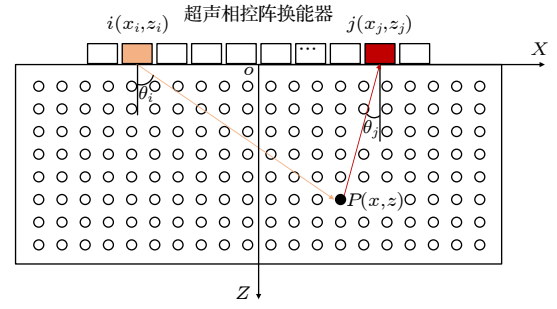


图 2 合成聚焦成像示意图

Fig. 2. Schematic diagram of synthetic focusing imaging.

2.2 BB-NSF 算法中信号相干性原理

由 BB-NSF 算法流程可见, 幅值 p 次缩放和恢复环节是信号相干性计算的关键环节, 以下通过 BB-NSF 与 TFM 算法图像强度之比讨论 p 值影响 FMC 信号相干性的基本原理. 假设各接收信号的幅值变化可以忽略 [27] (如: $X_i(t) \approx X_1(t), i = 1, 2, 3, \dots, N$), BB-NSF 算法与 TFM 成像算法的关系可表示为

$$\begin{aligned} &\frac{I_{\text{BB-NSF}}(x, z)}{I_{\text{TFM}}(x, z)} \\ &= \frac{\left| \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt[p]{X_i(\tau_i(x, z))} e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))} \right)^p \right|}{\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(\tau_i(x, z)) e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))} \right|} \\ &\approx \left| \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))} \right)^{p-1} \right| \\ &\Rightarrow I_{\text{BB-NSF}}(x, z) \\ &\approx \left| \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j\phi_i(\tau_i(x, z))} \right)^{p-1} \right| \cdot I_{\text{TFM}}(x, z), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $I_{\text{TFM}}(x, z)$ 为 TFM 算法重构图像任意像素点的强度, 因此 BB-NSF 算法可以近似理解为 $I_{\text{TFM}}(x, z)$ 与 FMC 各接收信号相位相干因子的 $(p-1)$ 次方加权 [27]. 由于 $(p-1)$ 次幂的作用, 当 $p < 2$ 时, 相位相干权值趋于一致, 此时 $I_{\text{BB-NSF}}(x, z)$ 重构图像的信噪比与 $I_{\text{TFM}}(x, z)$ 接近; 当 $p > 2$ 时, 相位相干权值增大, 接收信号中的低相干分量 (如噪声) 被抑制, 使超声成像具有更好的杂波抑制效果. 值得注意的是, 随着 p 取值的增加, BB-NSF 算法能够显著提高缺陷的信噪比, 但同时会对回波幅值较弱的有用信号产生部分抑制; 当 $p = 2$ 时, $I_{\text{BB-NSF}}(x, z)$

获得与 F-DMAS 相当的高信噪比超声图像 [27,28]. 因此本文将 p 值设置为 2, 以便于 F-DMAS 重构图像进行定量评价.

2.3 曲面延时法则修正

与平面试件的成像算法不同, 当柔性超声阵列直接耦合于曲面试件表面时, 各阵元的几何位置坐标会发生改变, 空间像素点接收超声波的时间也会随之改变, 因此需修正延时法则用以实现成像空间的准确映射和图像重构. 图 3 所示为曲面试件的柔性换能器阵列的超声信号飞行时间示意图. 建立的二维直角坐标系 Oxz , 坐标原点 O 设置在柔性换能器阵列中心, x 轴沿被测试块表面轮廓向右的切线方向, z 轴与被测试块表面轮廓法线方向指向被测区域.

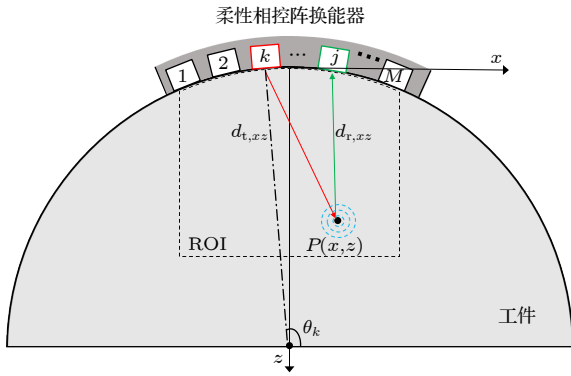


图 3 曲面试件后处理成像算法延迟时间计算原理图

Fig. 3. Schematic diagram of the time delay calculation of the post-processing imaging algorithm for curved workpiece.

假如柔性阵列与轮廓表面耦合时阵列的长度不被拉伸或压缩, 则换能器的有效检测弧长可表示为 $L = (M - 1)d$, 其中 d 为阵元间距, M 为阵元数量. 对于半径为 R 的曲面试块, 换能器的有效检测弧长对应的圆心各阵元与 x 坐标轴所对应的夹角

θ_k 可表示为

$$\theta_k = \frac{\pi}{2} + \frac{L}{2R} - \frac{L}{R \cdot M} k, \quad (5)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, M$, 根据圆的参数方程, 此时柔性换能器阵元的 x 轴和 z 轴坐标可分别表示为 $x'_k = R \cos \theta_k$ 和 $z'_k = R(1 - \sin \theta_k)$. 考虑被测试块的曲面轮廓, 经过延时修正后的飞行时间可改写为

$$\tau'_i(x, z) = \frac{1}{c_L} \left[\sqrt{(x'_t - x)^2 + (z'_t - z)^2} + \sqrt{(x'_r - x)^2 + (z'_r - z)^2} \right]. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (3) 式, 可得到曲面构件的 BB-NSF 成像算法.

3 仿真分析

3.1 试件模型与仿真条件

在 CIVA 软件中建立图 4 所示的曲面、含不同取向裂纹的颗粒复合材料 PBX 试件模型, 其中外型面半径 R_1 为 50 mm, 内型面半径 R_2 为 40 mm, 不同位置的厚度为 6.23—26.23 mm. 颗粒复合物中黏结剂的含量设置为 5%, 颗粒的含量为 95%. 颗粒复合物模型简化为密度 $1895 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 纵波声速为 $3010 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的各向同性材料. 在颗粒复合物模型上建立了三个取向分别为 60° , 30° 和 0° 的底面开口槽缺陷 A, B 和 C, 缺陷长度为 5.0 mm, 宽度为 0.5 mm, 取向定义为裂纹与裂根处试块轮廓法线的夹角. 选用 16 阵元柔性线阵换能器直接与被测模型的外轮廓耦合并采集 FMC 数据, 采样频率设为 33.3 MHz. 柔性换能器中心频率为 2.5 MHz, 阵元的宽度和长度分别为 3.5 mm 和 6.0 mm, 阵元中心间距为 1.5 mm.

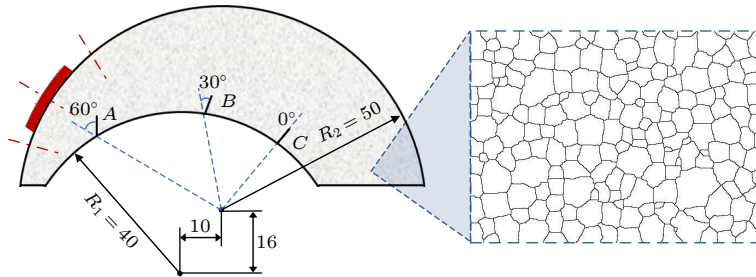


图 4 颗粒复合材料 PBX 的裂纹缺陷几何模型示意图

Fig. 4. Geometric model of PBX workpiece with cracks.

3.2 仿真结果分析

图 5 所示是柔性换能器在不同位置时的 BB-NSF 成像仿真结果, 可以看出, 提出的算法对取向 60° 、埋深约 16 mm 的缺陷 A 能够实现有效检出. 随着柔性换能器由左向右移动, 换能器中心线尚未跨过缺陷 A 中心位置时, 裂纹表面具有显著的回波幅值强度, 缺陷形状特征可以完整呈现, 缺陷类型可以被有效识别 (见图 5(a) 和图 5(b)). 当换能器中心线逐渐跨过缺陷位置, 裂根和裂尖仍然能够清晰分辨, 但裂纹轮廓信息开始出现部分缺失, 直至完全消失 (见图 5(c) 和图 5(d)). 因此, 对于曲面 PBX 构件裂纹缺陷的检测, 当换能器中心线与裂纹缺陷轮廓呈一定角度、且换能器中心位于裂纹缺陷根部位置时, 缺陷和试块底面轮廓信息能够完整获取, 使成像效果达到最佳. 图 5(e) 和图 5(f) 所示是缺陷 B 和缺陷 C 的成像结果, 由于裂纹取向较小, 换能器阵元接收到的信号几乎全部是裂纹尖端

的反射回波信号, 裂纹轮廓回波信号较弱, 造成裂纹轮廓信息缺失, 但裂尖信息得到保留和呈现.

为了评价 BB-NSF 相比传统 TFM 在成像噪声抑制效果方面的提升, 利用仿真的 FMC 数据对比不同成像算法获得缺陷成像的信噪比, 使用 $SNR = 20 \lg [I_{\max} / \text{RMS}(I_b)]$ 指标对图像质量进行了定量评价, 其中 I_{\max} 为定义缺陷区域的像素峰值强度, $\text{RMS}(I_b)$ 为无缺陷背景噪声区域内像素强度的均方根. 如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 相比于 TFM, 本文提出 BB-NSF 显著增强了缺陷区域的像素峰值强度 I_{\max} , 无缺陷背景噪声区域内像素强度的均方根 $\text{RMS}(I_b)$ 仅出现轻微的增加. 如图 6(c) 所示, 传统 TFM 成像的信噪比在 34—52 dB 区间, 本文提出 BB-NSF 的信噪比为 76—114 dB, 缺陷 A, B, C 信噪比分别提升了约 42 dB, 69 dB 和 61 dB, 提升效果显著, 体现出 BB-NSF 算法在抑制杂波提高图像信噪比方面的优势.

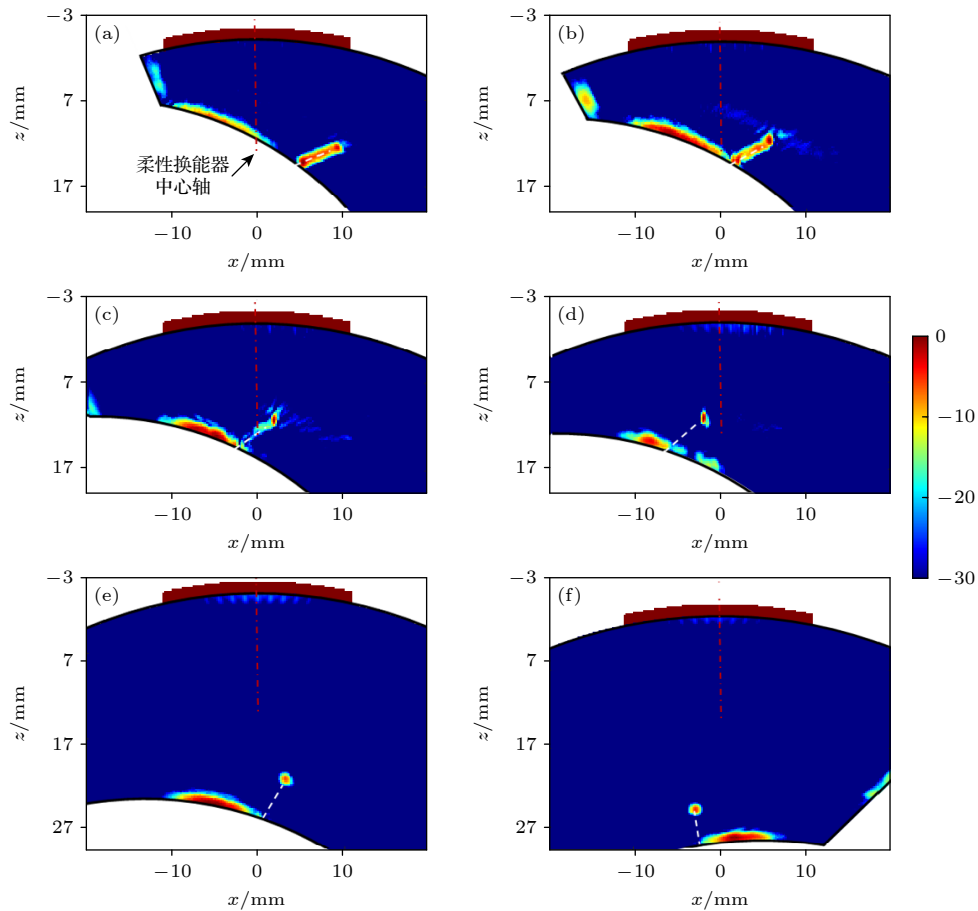


图 5 柔性换能器在不同检测位置时缺陷的仿真成像结果 (a)—(d) 缺陷 A; (e) 缺陷 B; (f) 缺陷 C

Fig. 5. Simulated images of (a)–(d) crack A, (e) crack B and (f) crack C with flexible transducers moving along surface.

4 实验结果分析

4.1 实验设置

选择带有人工预制裂纹缺陷的 PBX 试块作为检测对象, 其外形尺寸和缺陷位置大小与 CIVA 仿真模型相同, 实验示意图如图 7 所示. 该 PBX 试件由 95% HMX 晶体与 5% 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人工预制裂纹缺陷, 试件标定声速为 $3010 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 实验时, 柔性 PMUT 弯曲紧密贴覆于 PBX 试件表面, 选用凡士林作为耦合剂.

实验采用的超声成像系统由压电微机械超声换能器 (piezoelectric micromachined ultrasonic transducer, PMUT) 阵列、基于 FPGA 的下位机 FMC 数据采集模块和上位机 PC 组成 [29]. 由本项目组自主研发的 FPGA 数据采集模块最大可支持 64 个发射/接收并行通道, 实验时采用 1 个周期的正弦信号激励, 激励电压为 20 V. 柔性换能器在不同检测位置形成的 FMC 数据通过 FPGA 采集并上传

至上位机, 然后通过本文提出的算法对 FMC 数据进行后处理并最终获得缺陷重建图像. FMC 数据采集系统参数配置以及各缺陷裂尖埋深位置如表 1 所列.

表 1 超声换能器阵列和预制缺陷埋深参数

Table 1. Parameters of flexible transducers and prefabricated cracks.

换能器参数	取值	缺陷	裂尖埋深/mm
阵元个数	16	缺陷A	16
阵元中心距/mm	1.5	缺陷B	23
中心频率/MHz	2.5	缺陷C	24

4.2 结果与分析

基于仿真结果选取合适的检测位置, 并采集被测 PBX 试块的 FMC 数据对其进行后处理成像. 图 8(a) 为未经曲面延时修正的 TFM 成像结果, 可以看到不仅图像存在严重的背景噪声, 裂纹缺陷 A 和被测试块的底面轮廓也发生严重失真, 从而导致无法判断缺陷的形状和真实位置. 相比之下, 图 8(b) 引入曲面延时修正后, 被测试块的底面轮廓和缺陷信息得到呈现, 但背景噪声仍然严重, 易造成误判.

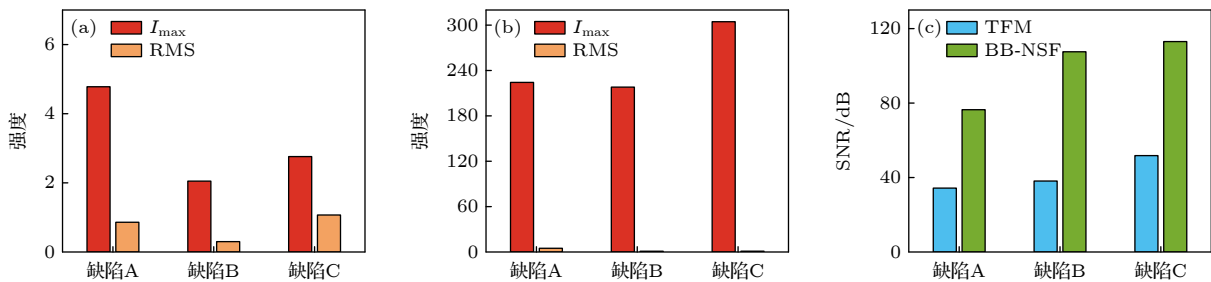


图 6 (a) TFM 图像和 (b) BB-NSF 图像缺陷区域的像素峰值、背景噪声区域内像素强度的均方根; (c) TFM 和 BB-NSF 缺陷的信噪比指标

Fig. 6. Pixel peak of the defect area and the root mean square of the pixel intensity in the background noise area of (a) TFM image and (b) BB-NSF image, respectively. (c) Comparison of SNR indicators for TFM and BB-NSF images.

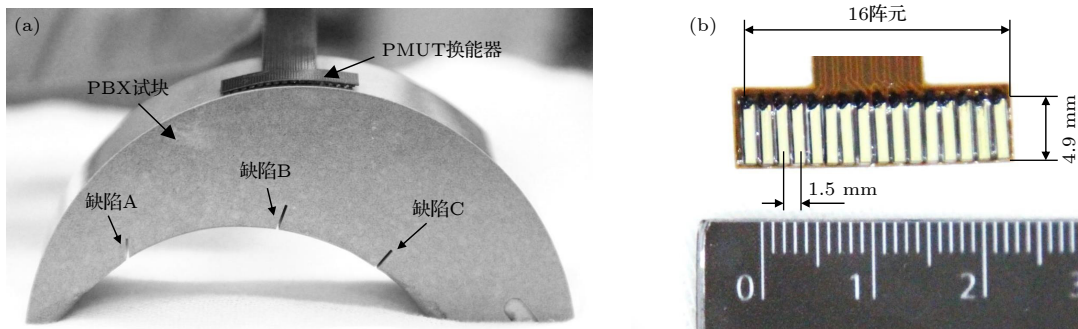


图 7 实验装置 (a) 采用柔性换能器检测的 PBX 试件; (b) 16 阵元柔性超声换能器 PMUT

Fig. 7. Experimental setup: (a) PBX workpiece with flexible transducers; (b) the flexible ultrasonic transducer of PMUT with 16 array elements.

图 8(c) 和图 8(d) 分别给出了引入曲面延时修正的 F-DMAS 和本文提出的 BB-NSF 图像, 可以看出, 由于对全矩阵数据进行了非线性运算, 增强了相干信号 (缺陷回波) 并削弱了非相干信号 (噪声), 所以缺陷位置的像素强度增加, 非缺陷位置的像素强度减小, 使近场区域和缺陷区域的整体信噪比都得到显著提升. 针对被测对象的曲面轮廓特点, 采用曲面延时修正的 BB-NSF 算法分别对 3 处裂纹缺陷图像进行重构, 得到如图 8(e) 所示的全场图. 从图 8(e) 成像结果中可以获取缺陷 A 的形状和位置特征, 对于缺陷 B 和 C, BB-NSF 图像的背景噪声大幅度降低且提高了缺陷 B 和 C 裂尖信号的强度, 同时保留了被测试块的底面和侧壁轮廓信息, 该规律与图 5 的仿真结果具有较佳的一致性.

如图 9 所示, 以第 6 阵元发射、第 8 阵元接收的 A 扫描波信号为例进一步分析 FMC 时域信号的信噪比. 从提取的信号中可以观察到幅值较大的

结构噪声和电噪声, 这是由于颗粒复合材料造成的声散射导致回波信号成分变得复杂. 另外在提取的信号中还发现幅值较高的始发波, 可以推测这些信号是产生近场噪声的主要原因, 会导致出现近场盲区, 对缺陷判断造成干扰. 基于图 8 中获得的 BB-NSF 成像结果, 根据缺陷位置反推计算延时时间, 进而在对应的接收信号中对 A, B, C 缺陷回波进行定位, 计算可得信噪比分别为 24.19 dB, 9.56 dB, 8.02 dB. 缺陷 B 和 C 的回波信号的信噪比较低. 综上可得, 在 A 扫描波信噪比低、无法识别缺陷信号的情况下, BB-NSF 算法仍然能够对接收信号中的杂波和噪声信息进行有效抑制, 并获得高信噪比的超声成像结果.

4.3 缺陷的成像质量定量评价

计算不同算法对缺陷 A, B 和 C 成像结果的信噪比和运算时间如表 2 所列. 在成像算法中引入

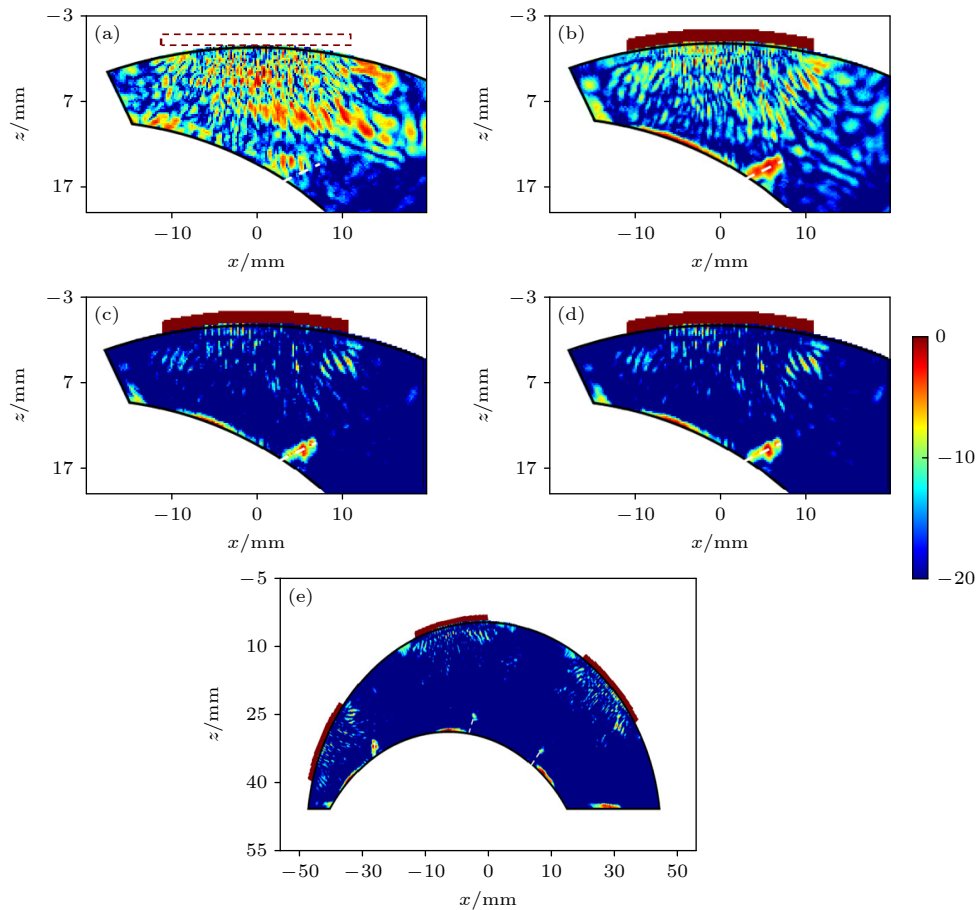


图 8 不同算法对 PBX 缺陷的成像结果对比 (a) 未延时修正 TFM; (b) 延时修正后 TFM; (c) F-DMAS; (d) BB-NSF 算法; (e) 利用延时修正后 BB-NSF 算法重构的全场图像

Fig. 8. Comparison of cracks image with TFM algorithm: (a) Without time delay correction; (b) with time delay correction; (c) F-DMAS; (d) BB-NSF; (e) the reconstructed image of cracks A, B and C with BB-NSF algorithm.

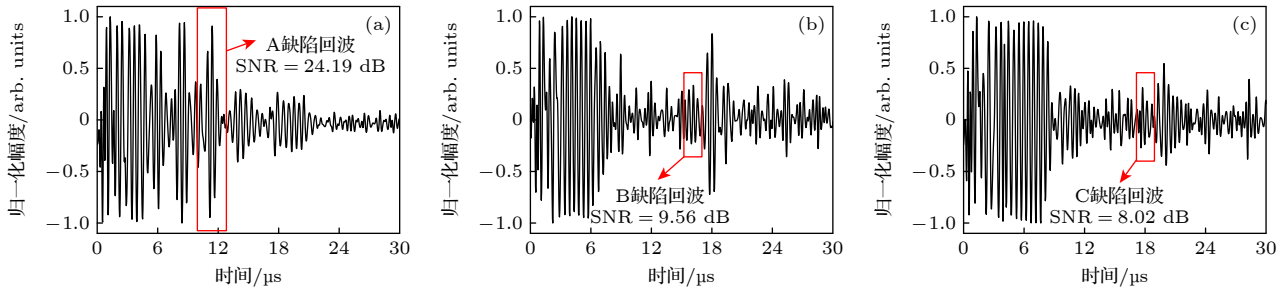


图 9 $T = 6, R = 8$ 时域信号 (a) 缺陷 A; (b) 缺陷 B; (c) 缺陷 C

Fig. 9. Time domain signal transmitted by the sixth array element and received by the eighth array element for defect (a) A, (b) B and (c) C, respectively.

曲面延时修正法则, 相比于经典的 TFM, 基于指向性校正的 TFM 和相干因子的 TFM 成像算法对缺陷 A, B 和 C 的信噪比均得到提高, 两种算法分别平均提高了约 3.65 dB 和约 6.85 dB, 计算一帧图像所消耗的运算时间小幅增加 (0.2 s 和 0.03 s); F-DMAS 成像算法可以显著提高缺陷 A, B 和 C 的信噪比指标 (平均约 10.64 dB), 虽然可以清晰观察到缺陷的位置, 但 F-DMAS 算法获得一帧图像耗时严重 (142.79 s), 计算效率低下. 相比之下, 本文提出的 BB-NSF 可以通过设置 FMC 数据中接收信号之间的信号空间相干度系数 p 来实现成像结果信噪比的动态调节. 当 $p = 1$ 时, 各缺陷的信噪比指标与 TFM 相当, 随着 p 值的增加缺陷的信噪比得到提升; 当 $p = 1.5$ 时, 各缺陷的信噪比指标介于 $p = 1$ 和 $p = 2$ 之间, 但由于非整数幂的操作将导致运算时间稍有增加; 当 $p = 2$ 时可以获得与 F-DMAS 同一水平的信噪比指标, 同时运算时间仅需要 0.41 s, 显著改善了 F-DMAS 成像算法计算效率低的缺点, 且相比于经典的 TFM 成像算法耗时仅增加了 0.12 s. 为进一步说明 p 值取时对信噪比和计算效率的影响规律, 分别采用 1.0—4.0 间隔 0.2 的 p 值进行 BB-NSF 成像, 如图 10 所示. 结果表明, 随着 p 值增加, 重构图像的信噪比可以得到进一步提升, 而单帧图像计算时间保持稳定 (0.38—0.62 s). 因此, BB-NSF 算法可以通过设置 p 值得到不同成像质量的超声重构图像, 在获得高信噪比的同时, 在计算效率方面也体现出显著优势.

此外, 从表 2 可以看出, 对任意一种算法, 随着缺陷 A, B, C 探测深度的增加, 信噪比呈现出明显的下降趋势, 尤其是未经算法优化的 TFM 成像, 其信噪比低至 5.02 dB (缺陷 C), 此时缺陷信号会完全被背景噪声淹没. 这主要是 PBX 材料的强衰减特性造成的, 远场缺陷的回波信号可能会被淹没

在电噪声或结构噪声中, 造成缺陷的误检或漏检. 本文提出的 BB-NSF 算法在提高全场图像信噪比的情况下, 使探测位置较深的缺陷 C 的信噪比提升至 15.64 dB, 抑制了背景噪声所带来的影响, 从而实现缺陷信息的有效识别, 说明该算法一定程度上提高了远场缺陷的图像探测能力, 降低了误检或漏检的可能性.

表 2 不同算法的 PBX 裂纹缺陷实测信噪比和计算效率对比

Table 2. Experimental comparison of SNR and consuming time for conventional and proposed algorithms.

算法	信噪比/dB			计算效率/ (s·帧 ⁻¹)
	缺陷A	缺陷B	缺陷C	
TFM ^[30]	9.38	7.35	5.02	0.29
指向性校正的TFM ^[12]	12.55	10.87	9.28	0.49
相干因子的TFM ^[31]	13.04	15.01	14.25	0.32
F-DMAS ^[25]	19.19	19.18	15.30	142.29
BB-NSF ($p = 1$)	9.38	7.35	5.02	0.38
BB-NSF ($p = 1.5$)	14.33	13.37	10.59	0.59
BB-NSF ($p = 2.0$)	19.15	19.19	15.64	0.41
BB-NSF ($p = 3.0$)	27.98	29.43	24.30	0.60

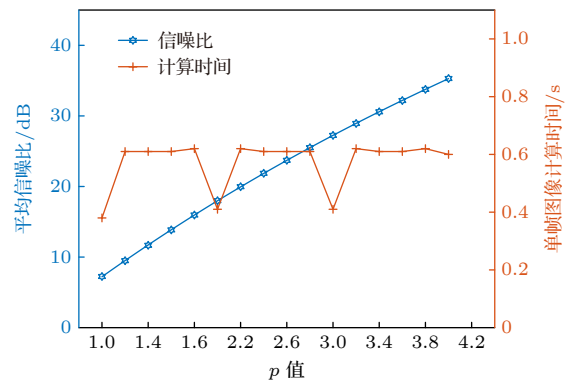


图 10 不同 p 值时 BB-NSF 算法的成像信噪比和计算效率
Fig. 10. Calculated SNR and consuming time of BB-NSF algorithm with different p values.

5 结 论

针对颗粒填充复合炸药裂纹缺陷高信噪比成像问题, 提出一种基带非线性合成聚焦 (BB-NSF) 的后处理成像算法, 使用柔性换能器阵列对曲面 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) 结合 BB-NSF 算法, 柔性换能器对曲面 PBX 试件不同取向和不同深度裂纹的成像特点各不相同, 对取向角 60° 、埋深 16 mm 的缺陷, 裂尖、裂根以及形状特征可以完整呈现, 对于取向角 0° 、埋深 24 mm 和取向角 30° 、埋深 23 mm 的缺陷, 部分形状和轮廓特征会缺失;

2) 实验表明, 曲面修正的 BB-NSF 算法利用全矩阵数据中各通道接收信号的空间相干性, 可以将颗粒填充复合炸药 PBX 裂纹缺陷的超声重构图像信噪比提升 10 dB 以上, 该算法显著地改善了裂纹缺陷的检出能力, 同时兼顾成像效率;

3) p 值的选取会直接影响 BB-NSF 算法的信噪比提升程度和成像效率, 随着 p 值增加, 重构图像的信噪比可以得到进一步提升, 而计算效率保持稳定, 体现出 BB-NSF 算法在强衰减复合材料内部缺陷成像方面的应用优势和前景。

参考文献

- [1] Dong H S, Zhou F F 1989 *Performance of High-energy Explosives and Related Substances* (Beijing: Science Press) pp20–32 (in Chinese) [董海山, 周芬芬 1989 高能炸药及相关物性能 (北京: 科学出版社) 第20—32页]
- [2] Fan H, He G S, Yang Z J, Nie F D, Chen P W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 106201 (in Chinese) [范航, 何冠松, 杨志剑, 聂福德, 陈鹏万 2019 物理学报 **68** 106201]
- [3] Yang Z F, Tian Y, Li W B, Zhou H Q, Zhang W B, Li J M 2017 *Materials* **10** 660
- [4] Zong H H, Zhang W B, Xiao L, Zhou H Q, Yang Z F 2016 *Chin. J. Energ. Mater.* **24** 166 (in Chinese) [宗和厚, 张伟斌, 肖丽, 周海强, 杨占锋 2016 含能材料 **24** 166]
- [5] Jiang C, Yang Z F, Li W B, Zhang W B, Tian Y 2020 *Chin. J. Energ. Mater.* **28** 749 (in Chinese) [江畅, 杨占锋, 李卫彬, 张伟斌, 田勇 2020 含能材料 **28** 749]
- [6] Drinkwater B W, Wilcox P D 2006 *NDT & E Int.* **39** 525
- [7] Li W, Zhou Z, Li Y 2019 *Ultrasonics* **96** 75
- [8] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D 2005 *NDT & E Int.* **38** 701
- [9] Peng C Y, Peng S, Wang Z X, Zhang J 2019 *Far East NDT New Technology & Application Forum* Qingdao, China, June 24–27, 2019 p11
- [10] Wilcox P D, Holmes C, Drinkwater B W 2007 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54** 1541
- [11] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D, Hunter A J 2010 *NDT & E Int.* **43** 123
- [12] Zhang H Y, Song J X, Ren Y, Zhu Q, Ma X F 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 114301 (in Chinese) [张海燕, 宋佳昕, 任燕, 朱琦, 马雪芬 2021 物理学报 **70** 114301]
- [13] Nakahata K, Tokumasu S, Sakai A, Iwata Y, Ohira K, Ogura Y 2016 *NDT & E Int.* **82** 13
- [14] Pan Q, Xu X, Xu L, Jia Y, Liu X, Xiao D, Chang M 2019 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* Tianjin, China, August 4–7, 2019 p2041
- [15] Li M, Xu Y, Xiao P, Zhang W B, Li L, Cai W L, Zhou H Q, Chen Z M 2020 *Chin. J. Energ. Mater.* **29** 29 (in Chinese) [李明, 徐尧, 肖盼, 张伟斌, 李丽, 蔡文路, 周海强, 陈振茂 2020 含能材料 **29** 29]
- [16] Jeon S, Park E Y, Choi W, Managuli R, Jong Lee K, Kim C 2019 *Photoacoustics* **15** 100136
- [17] Mozaffarzadeh M, Mahloojifar A, Periyasamy V, Pramanik M, Orooji M 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** 1
- [18] Yang G, Amidi E, Zhu Q 2021 *Biomed. Opt. Express* **12** 2250
- [19] Mozaffarzadeh M, Mahloojifar A, Orooji M 2017 *Iranian Conference on Electrical Engineering* Tehran, Iran, May 2–4, 2017 p65
- [20] Matrone G, Savoia A S, Caliano G, Magenes G 2015 *IEEE Trans. Med. Imaging* **34** 940
- [21] Matrone G, Savoia A S, Caliano G, Magenes G 2017 *Ultrasonics* **75** 216
- [22] Matrone G, Ramalli A, Savoia A S, Tortoli P, Magenes G 2016 *IEEE Trans. Med. Imaging* **36** 478
- [23] Luo L, Tan Y, Li J, Zhang Y, Gao X 2022 *NDT & E Int.* **127** 102601
- [24] Teng D, Liu L, Xiang Y, Xuan F Z 2022 *Ultrasonics* **128** 106881
- [25] Yu L, Song Y, Li X 2022 *NDT & E Int.* **130** 102660
- [26] Shen C C 2020 *Biomed. Signal Process.* **60** 101964
- [27] Shen C C 2021 *Ultrasonics* **96** 165
- [28] Kozai R, Okubo K, Tagawa N, Irie T, Yoshizawa M 2019 *IEEE International Ultrasonics Symposium* Glasgow, UK, October 6–9, 2019 p320
- [29] Ji W, Liu L, Xing Z, Zhang D, Wang Y, Chen L, Chen Y, Sun X, Du Y 2021 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **68** 1380
- [30] Zhou Z G, Peng D, Li Y, Hu H W 2015 *Chin. J. Mech. Eng.* **51** 1 (in Chinese) [周正干, 彭地, 李洋, 胡宏伟 2015 机械工程学报 **51** 1]
- [31] Mozaffarzadeh M, Yan Y, Mehrmohammadi M, Makkiabadi B 2018 *J. Biomed. Opt.* **23** 026005

High signal-to-noise-ratio ultrasonic imaging of crack defects in particles filled composite explosives^{*}

Li Hai-Ning¹⁾ Yu Li-Da¹⁾²⁾ Gan Ren-Jie¹⁾³⁾

Zhang Wei-Bin¹⁾ Yang Zhan-Feng^{1)†}

¹⁾ (Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

²⁾ (School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

³⁾ (School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

(Received 4 April 2023; revised manuscript received 30 May 2023)

Abstract

Polymer bonded explosive (PBX) is a kind of composite material with highly filled molding explosive particles (normally more than 95%) and a small quantity of binders (less than 5%). The effective detection of internal cracks in PBX is of great significance in evaluating structural integrity and safety reliability.

Ultrasonic phased array detection and imaging methods show great advantages and potential in detecting crack defects. But acoustic test results indicate that the PBX has unique characteristics with low longitudinal wave velocity ($\sim 3000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and strong attenuation (attenuation coefficient $\sim 400 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ for 2.5 MHz ultrasound). When the defect is imaged by traditional ultrasonic total focusing method (TFM), the structural noises at the boundaries between particles lead to low signal-to-noise ratio (SNR) in the FMC signals and strong background noise in reconstructed image, which will disturb the detection of cracks.

To realize the high SNR imaging of crack defects in PBX, an ultrasonic imaging algorithm based on baseband nonlinear synthetic focusing (BB-NSF) is proposed. By utilizing the spatial coherence of the received signals in full matrix capture (FMC) data, the pixel intensity at defect position can be enhanced while the background noise can be drastically weakened. The delay rule of the algorithm is modified according to the characteristics of PBX surface configuration. In this way, the high SNR imaging of crack defects with different orientations of PBX surface configuration is realized, and the quality of the reconstructed images is compared and evaluated quantitatively. Meanwhile, the base band transformation in calculation process optimization could significantly reduce calculation burden and increase imaging efficiency.

Experimental results show that the proposed algorithm can effectively suppress background noise and significantly improve the ability to detect the PBX cracks. The effective suppression to background noise makes the defect more highlighting and distinguished easily. For the BB-NSF algorithm, spatial coherence coefficient p is a crucial parameter used for dynamically regulating the SNR of reconstructed image. When p value is more than 2.0, the SNR of the ultrasonic reconstructed image of PBX crack defect is improved by more than 10 dB compared with that of the traditional linear synthetic focusing imaging. With the increase of p value, the SNR is further improved, while the calculation efficiency for a single image is almost kept stable. Moreover, the increase of SNR to some extent will improve the far-field detect capability.

Besides, with the BB-NSF algorithm, flexible transducer inhibits different imaging characteristics of for cracks with different orientations and depths in curved PBX specimens. For defects with large orientation angle and buried depth, the tip, root and shape of cracks can be completely present. For defects with small orientation angle and buried depth, part of shape and contour features will be lost.

In conclusion, the BB-NSF algorithm shows the advantage of high SNR and calculation efficiency in imaging PBX cracks, and exhibits great application prospect in imaging internal defects of other strongly attenuated composites.

Keywords: polymer bonded explosives, crack defect, ultrasonic phased array, baseband nonlinear synthesis focusing algorithm

PACS: 43.20.+g, 43.25.+y, 43.35.+d, 43.35.Zc

DOI: 10.7498/aps.72.20230522

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52105566) and the China Academy of Engineering Physics Foundation (Grant No. CX20210003).

[†] Corresponding author. E-mail: zfyang22@163.com

颗粒填充复合炸药裂纹缺陷的高信噪比超声成像方法

李海宁 禹利达 甘仁杰 张伟斌 杨占锋

High signal-to-noise-ratio ultrasonic imaging of crack defects in particles filled composite explosives

Li Hai-Ning Yu Li-Da Gan Ren-Jie Zhang Wei-Bin Yang Zhan-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 154301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230522

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230522>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维增强复合材料褶皱缺陷的超声成像

Ultrasonic imaging of wrinkles in carbon-fiber-reinforce-polymer composites

物理学报. 2021, 70(11): 114301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210032>

三氨基三硝基苯基高聚物粘结炸药热力学性质的理论计算研究

Theoretical study of interface thermodynamic properties of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene based polymer bonded explosives

物理学报. 2019, 68(10): 106201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190075>

基于卷积神经网络的白蚀缺陷超声探测

Ultrasonic detection of white etching defect based on convolution neural network

物理学报. 2022, 71(24): 244301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221504>

光纤相控阵稀疏排布优化算法对比

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array

物理学报. 2021, 70(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768>

利用扩散场信息的超声兰姆波全聚焦成像

Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information

物理学报. 2018, 67(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181268>

一种强噪声背景下微弱超声信号提取方法研究

Weak ultrasonic signal detection in strong noise

物理学报. 2018, 67(21): 210501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180789>