

文章编号:1006-9941(2024)07-0693-09

基于CT图像建模的TATB基PBX超声检测仿真方法

李智锋^{1,2}, 林莉¹, 张伟斌², 赵文瑕¹, 马志远¹, 李海宁²

(1. 大连理工大学无损检测研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为突破TATB基PBX超声仿真精度的局限,实现结构与性能关联的超声无损检测与表征,提出基于CT图像建模的PBX超声仿真建模方法,利用CT图像中颗粒相与黏结剂相显著的灰度分布差异提取结构形态和特征,通过对CT图像切片降噪、二值化、边界优化等处理,获得了包含造型粉颗粒及边界形态的二维几何结构模型,并将该模型用于超声传播过程的有限元仿真,定量对比了基于CT图像的超声仿真模型与Voronoi模型仿真效果的差异。研究表明,基于CT图像模型可以实现TATB颗粒及边界形态随机复杂结构特征的有效刻画,使得超声仿真结果与实验更趋一致,声速、衰减、频域幅值和表观积分背散射系数的误差分别为0.32%、1.14%、0.92%和1.55%,均在2%以内,相较于Voronoi模型的误差(2.77%、35.93%、20.70%、13.68%)大幅降低,仿真准确性得到显著提升。

关键词: 高聚物黏结炸药(PBX);CT图像;超声检测;仿真模型

中图分类号: TJ55;TB55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024089

0 引言

以1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯(TATB)为基的高聚物黏结炸药(Polymer Bonded Explosives, PBX)由高能TATB晶体颗粒填充和高聚物黏结剂组成,是一种多相非均质脆性复合材料。在制备、贮存或使用过程中,由于受温度时效、机械应力等作用,PBX可能产生老化变质、蠕变损伤等,会引起安全问题^[1-3],因此对PBX性能的无损检测与表征研究具有重要的工程意义。

超声检测技术具有检测灵敏度高、对材料组成结构敏感、现场应用方便等特点,已成为PBX损伤检测、缺陷成像与性能评价的重要手段^[4]。例如,针对曲面PBX构件裂纹检测问题,李萌等^[5]基于有限元法和典型检测工况,建立了PBX超声无损检测数值模型,研

究了入射角对弯曲PBX组件裂纹水浸超声小角度斜入射检测结果的影响。因此,准确的有限元模拟仿真结果可以为超声检测提供指导,但是传统的超声检测仿真模型中通常将PBX简化为单一均质材料,无法反映出PBX多相非均质的细观结构特点,导致仿真结果与实验误差偏大,仿真模型在微细结构变化、损伤表征以及超声检测机制阐释等方面受到限制。近年来为提升数值仿真的准确性,基于规则形状的结构仿真模型被广泛研究,已有学者基于PBX圆形颗粒结构模型,研究材料的有效弹性模量与造型粉颗粒体积分数、形状和级配、孔隙率等因素之间的关系,建立超声衰减系数、颗粒体积分数和超声频率之间关联,并通过实验验证了仿真结果的有效性^[6],该工作开启了PBX超声检测数值仿真的新视角。

为进一步提高数值模拟的准确性,超声仿真模型本身需要从尺度、结构特征、两相分布等方面充分接近乃至还原PBX真实结构。TATB基PBX内部造型粉颗粒尺寸在几十到几百微米不等,边界不规则,具有粒径分布随机、填充度高等特点^[7-10],王竟成等^[11-12]采用有限元方法对比了造型粉颗粒分别简化为六边形、圆形和泰森多边形(Voronoi)情况下的数值模型的有效弹性模量,结果表明,圆形颗粒预测值误差超过158%,

收稿日期:2024-03-22;修回日期:2024-05-08

网络出版日期:2024-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助(52105566)

作者简介:李智锋(1998-),男,硕士生,主要从事材料超声无损检测与评价研究。e-mail:ndt_lizhifeng@163.com

通信联系人:李海宁(1990-),男,高级工程师,主要从事含能材料无损检测与评价研究。e-mail:haining_lee@caep.cn

引用本文:李智锋,林莉,张伟斌,等.基于CT图像建模的TATB基PBX超声检测仿真方法[J].含能材料,2024,32(7):693-701.

LI Zhi-feng, LIN Li, ZHANG Wei-bin, et al. Simulation Method Based on CT Image Modeling for the Ultrasonic Detection of TATB-based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(7):693-701.

六边形预测值误差超过 114%, Voronoi 模型^[12]预测误差为 28%。其将颗粒边界简化为圆形或多边形等规则形态, 虽然模型构建方便且体积分数与级配相对可控, 但忽略了颗粒边界的复杂结构特征, 与实际情况差异明显, 导致模拟与实验结果难以高度吻合。上述研究表明, 与圆形和六边形相比, Voronoi 模型的数值模型更接近实际材料结构, 其误差远小于二者, 但仿真与实验结果之间仍存在明显偏差。只有建立能够反映材料复杂结构特征, 尤其是包含造型颗粒不规则复杂边界特征的模型, 才能够获得更加精准的超声检测仿真结果。

本研究利用电子计算机断层扫描(CT)成像技术获取 TATB 基 PBX 的三维结构特征, 并通过构建特殊形态学结构, 对二值化处理后的图像内部造型粉颗粒边界进行修复, 有效保留造型粉颗粒细观结构及边界特征, 建立能够刻画细观尺度上造型粉颗粒及边界形态的超声仿真模型 MBCT(Model Based on CT)。进一步通过模拟仿真获得了时域声速、衰减系数、频域幅值和表观积分背散射系数, 通过与 Voronoi 模型仿真及实验结果的对比, 验证了基于 CT 图像建模在仿真精度方面的优势和有效性。

1 检测原理与建模方法

1.1 超声检测原理

利用超声脉冲反射法进行检测的原理如图 1 所示, 探头产生的脉冲波在样品上表面产生反射波, 进入样品内部的透射波到达底面后发生反射, 上表面及底面的反射波均被探头接收。当超声波在材料内部传播时, 由于造型粉颗粒与黏结剂之间存在不规则复杂边界, 且二者声阻抗差异明显, 声波会发生散射。因此, 底面回波和背散射信号中包含了丰富的内部结构

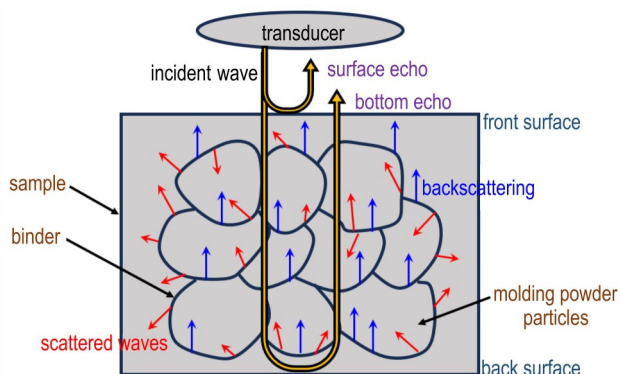


图 1 PBX 超声检测原理

Fig.1 Principle of ultrasonic detection of PBX

信息。

在多晶体介质中, 超声波散射衰减与晶体尺寸及分布关系十分密切。根据超声波波长 λ 与平均粒径 D 之间比值的不同, 超声波散射分为瑞利散射、随机散射和漫散射 3 种, 不同散射机制下超声衰减系数 α_s 与 D 、 f 之间的关系如下^[13]:

当 $2\pi D/\lambda \ll 1$ 时, 发生瑞利散射, 此时:

$$\alpha_s = C_1 D^3 f^4 \quad (1)$$

当 $2\pi D/\lambda \approx 1$ 时, 发生随机散射, 此时:

$$\alpha_s = C_2 D f^2 \quad (2)$$

当 $2\pi D/\lambda \gg 1$ 时, 发生漫散射, 此时:

$$\alpha_s = C_3 D^{-1} \quad (3)$$

式中, C_1, C_2, C_3 为与材料弹性参数、密度和超声波波速有关的常数。

由式(1)~(3)可知, 不同散射机制下造型粉颗粒直径 D 对超声波衰减系数的影响存在明显差异。

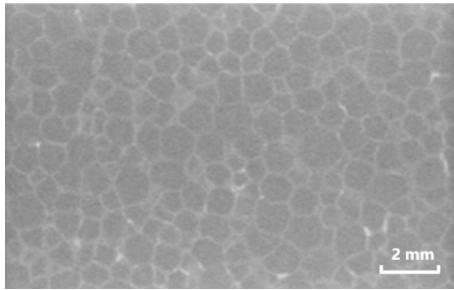
由以上分析可知, TATB 基 PBX 的颗粒与黏结剂分布特征对于分析超声传播特性至关重要。对于 TATB 基 PBX 而言, 其颗粒相和黏结剂相复杂结构特征的准确获取可以利用 CT 技术成像并经图像处理实现, 因为 CT 三维矩阵数据灰度的高低反映了被射线穿过物质位置处的能量衰减情况, 颗粒与黏结剂材料特性和密度的差异会导致 X 射线在穿过二者后能量衰减不一, 颗粒边界处存在显著灰度差异, 因此利用 CT 图像可以准确提取材料内部造型粉颗粒边界, 为超声仿真提供准确的几何模型输入。

1.2 基于 CT 图像建模

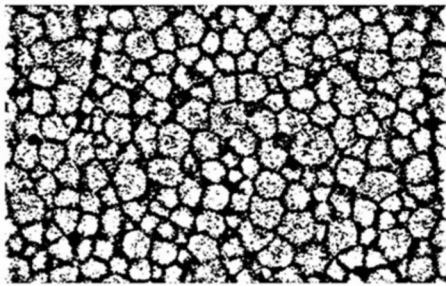
TATB 基 PBX 内部造型粉颗粒大小具有随机性且边界不规则, 准确构建黏结剂和颗粒形态及边界特征, 是实现超声检测建模的前提。本研究中将超声波在整个样品中的三维传播过程简化为其在声束轴线所在的二维截面上进行, 对于 CT 图像则直接提取其中与之相对应的截面构建仿真模型。该二维简化与实际的差别在于将声波空间传播行为结果以某一截面进行替代, 同时保留了 PBX 造型粉颗粒边界复杂结构特征, 确保简化等效方法合理适用。对样品进行 CT 图像采集, CT 体素大小为 $1024 \times 1024 \times 1024$, 空间分辨率 $21.5 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 。处理过程主要包括预处理、局部二值化、降噪及区域膨胀、结构优化等, 具体流程如图 2 所示:

(1) 局部二值化。如图 2a 所示, 原始 CT 图像中造型粉颗粒内部噪声严重, 需要采用局部二值化勾勒出颗粒边界雏形。首先计算图像上所有像素在 41×41

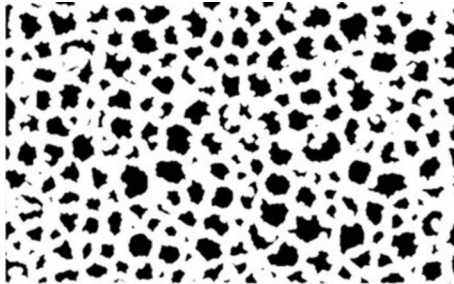
邻域像素内的灰度平均值 M 和标准差 σ , 阈值 $T=M-k\times\sigma$, 其中 k 为常数。为确保二值化后有效区分颗粒相和黏结剂相, 本研究中 k 取 $0.07^{[14]}$ 。处理后如图 2b 所示, 大部分区域黏结剂边界完整, 局部区域边界不连续, 出现“欠分割”现象。另有部分黑色区域呈离散点云, 混杂在颗粒相之中, 形成比较明显的噪点。



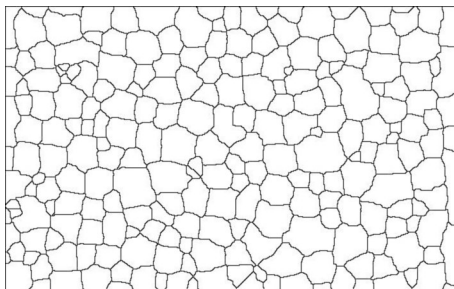
a. original CT image



b. binary processing image



c. boundary optimization image



d. structure optimization

图2 TATB基PBX的CT图像处理流程
Fig.2 CT image processing flow of TATB based PBX

(2)图像降噪及区域膨胀。统计二值化图像中的黑色连通区域,将像素小于一定数量的区域默认为噪点予以删除,再进行中值滤波平滑处理。借助MATLAB软件中形态学结构函数生成与颗粒形状更为接近的八边形结构,并对图像进行膨胀处理,消除二值化图像中的欠分割区域。处理后消除了噪点,且颗粒相形成稳定的封闭区域,黏结剂相也呈现全部连通状态,如图 2c 所示。

(3)结构优化。调用分水岭算法形成单个像素边界,然后进行边界像素扩充调整黏结剂相含量为 10%,即完成对 CT 图像的处理,得到在细观尺度上能够呈现造型粉颗粒及边界复杂形态的结构模型,如图 2d 所示。

1.3 超声模拟仿真

构建PBX超声仿真模型MBCT的主要流程为:将图 2 处理完成的几何模型导入多物理场仿真软件COMSOL,赋值材料属性,设置超声脉冲激励等初始条件,划分网格,进行有限元模拟。如图 3 所示,超声波声源长度 6 mm,频率 2.5 MHz,均与实际探头一致。为便于对比分析,构建Voronoi模型作为参照,颗粒数量及平均粒径选取与MBCT保持一致(图 3b)。检测中激励脉冲与高斯调制的正弦函数更为接近,因此选择正弦高斯脉冲波作为始发脉冲进行模拟,超声波声压 $p(t)$ 可表示为:

$$p(t) = A \exp \left[-\frac{(t - \frac{G}{1.35})(t - \frac{G}{1.72})}{a^2} \right] \cdot \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

式中, A 为声波幅值, G 为脉冲时间间隔, s ; a 为脉冲宽度, s ; f 为探头频率, MHz ; t 为声传播时间, s 。

超声仿真几何模型的密度赋值是基于三维 CT 图像中颗粒相和黏结剂相灰度值计算的。PBX 的三维 CT 图像中灰度较高的区域为黏结剂相,灰度较低的区域对应造型粉颗粒相,实验样品的 CT 三维体素数据中两相区域灰度比值约为 215:190。研究表明,CT 图像灰度值与材料密度线性相关性较好^[15],据此可计算造型粉颗粒和黏结剂的密度:

$$M = V \cdot \rho = (V_b + V_p) \cdot \rho = V_b \cdot \rho_b + V_p \cdot \rho_p \quad (5)$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_p} = \frac{215}{190} \quad (6)$$

式中, M 为样品总质量, g ; V_b 和 V_p 分别为样品黏结剂相和造型粉颗粒相体积, cm^3 ; ρ_b 和 ρ_p 分别为样品黏结剂相和造型粉颗粒相密度, $g \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

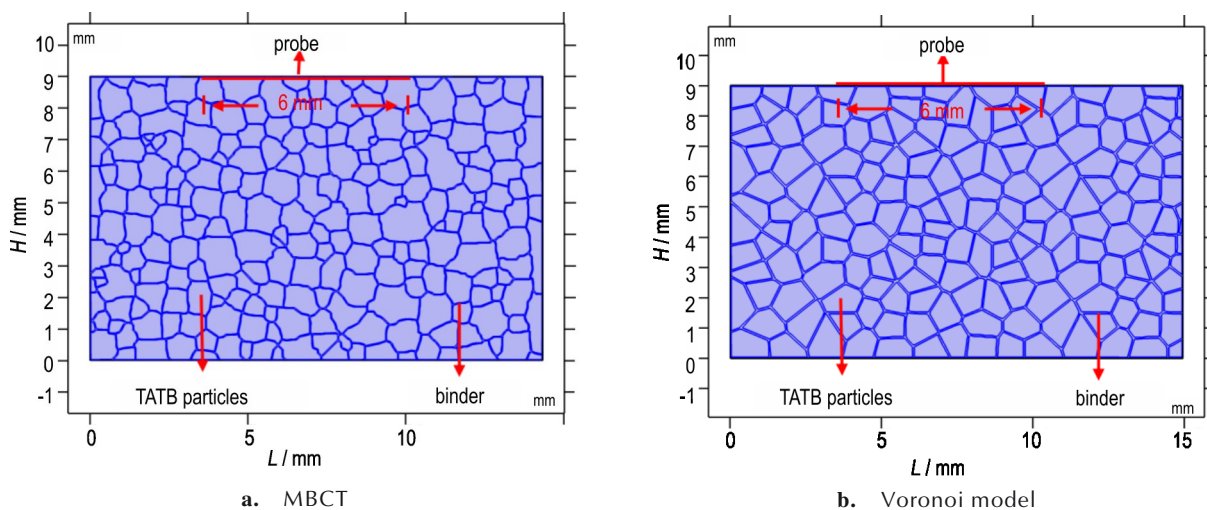


图3 MBCT和Voronoi超声仿真模型

Fig.3 Ultrasonic simulation models of MBCT and Voronoi

超声仿真几何模型中各介质弹性常数的赋值是利用超声法测量TATB基PBX样品的纵波和横波声速并进一步反演计算的。结合黏结剂的粘弹性能和准静态拉伸、压缩性能数据^[16-17],确定黏结剂和造型粉颗粒两相的弹性模量及泊松比,模型赋值的具体参数见表1。几何模型网格划分时,为保证计算精度,网格尺寸通常小于或等于计算波场中最小波长的1/10,本研究中最小波长为1.2 mm,网格尺寸选择0.12 mm,计算时间步长 dt 取 $0.04 \mu\text{s}$ 。

表1 用于超声仿真的TATB基PBX造型粉颗粒与黏结剂材料参数

Table 1 Material parameters of TATB based PBX molding powder particle and binder for ultrasonic simulation

phase composition	E / GPa	μ	ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
molding powder particle phase	12.0	0.33	1.880
binder phase	5.1	0.38	2.130

Note: E is elastic modulus, μ is poisson ratio, ρ is density.

2 实验方法

2.1 实验样品

TATB造型粉颗粒由TATB晶粉与F-2314黏结剂(晶粉纯度99.2%,自制)通过水悬浮法造粒成型,粒径范围0.8~1.5 mm,造型粉颗粒和黏结剂的质量比为9:1。造型粉颗粒经等静压制、机加成形,立方体尺寸为 $9 \text{ mm}\times 15 \text{ mm}\times 15 \text{ mm}$,密度为 $1.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

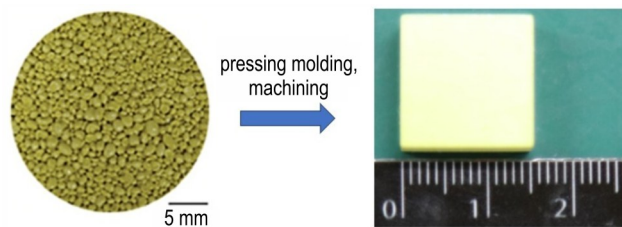


图4 TATB基PBX实验样品

Fig.4 Experimental sample of TATB based PBX

2.2 超声检测实验装置与参数

超声检测实验采用六轴水浸超声C扫描系统(阿塔米ACIS-01),实现机械运动扫查、信号处理和结果成像。其系统组成如图5a所示,主要由机械运动单元和超声信号采集处理单元组成。运动机构带动水浸聚焦探头进行机械运动扫查,超声信号采集单元同步发射与接收时域A扫描信号。实验中采用的是频率2.25 MHz的超声水浸聚焦探头(OLYMPUS V323-SU,频率2.25MHz),激励电压300 V,采样速率设置为50 MHz,扫查速度 $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,步进速度为 $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,扫查轴分辨率0.1 mm、步进轴分辨率0.1 mm,超声检测参数见表2。实验过程中保持探头中心线与样品表面垂直,通过调节探头与样品表面距离及增益,使得表面回波与底面回波均出现在显示界面上。典型的始发脉冲时域波形及其频谱分别如图5b与图5c所示。

3 结果与讨论

为定量对比和评价MBCT模型在TATB基PBX超

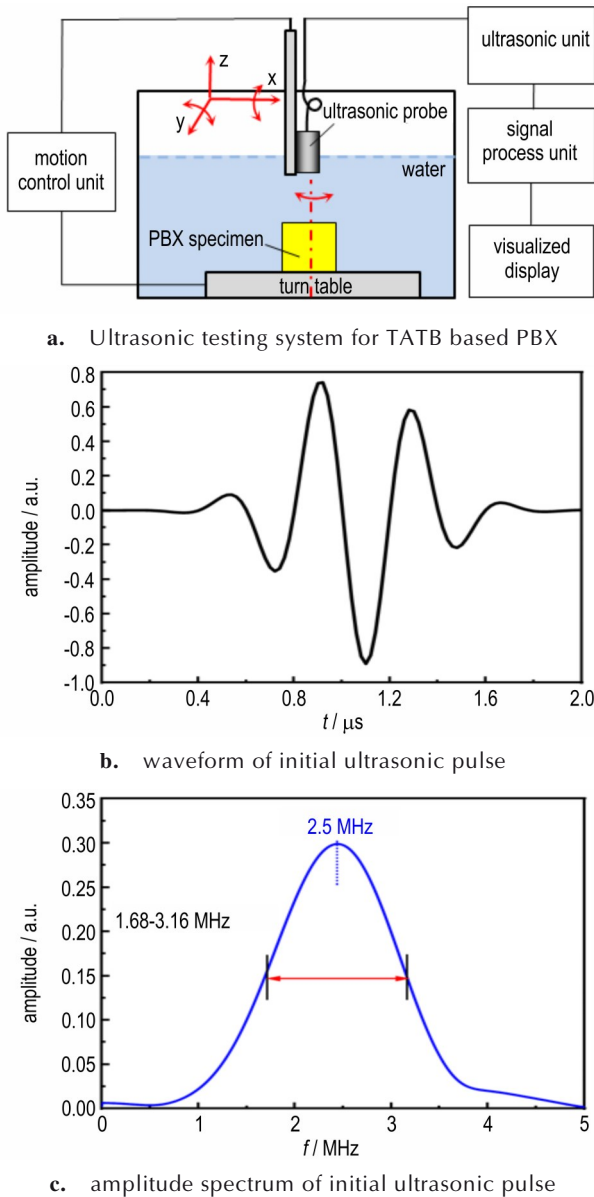


图5 超声检测装置、超声始发脉冲及幅度谱
Fig.5 Experimental setup, initial ultrasonic pulse and amplitude spectrum

表2 超声检测实验参数表

Table 2 Experimental parameters of ultrasonic testing

focusing depth / mm	probe diameter / mm	excitation voltage / V	scanning speed / mm·s ⁻¹	scanning precision / mm	sampling rate / MHz	gain / dB
10	6.0	300	50	0.1	50	28

声检测仿真精度提升情况,以下从声速、衰减系数等时域参数和主频幅值、背散射系数等频域参数对比分析了MBCT、Voronoi模型仿真与实验结果的误差,结合声波在PBX内部传播及散射机制分析综合评价模型仿真精度。

3.1 时域分析

3.1.1 时域波形

对比MBCT与Voronoi模型仿真得到的波形和实验波形之间的差异,如图6所示,可以看出,两种模型的仿真表面回波、底面回波波形与实验保持了良好的一致性。对比底面回波位置及幅值,MBCT与实验结果之间更为接近,Voronoi模型的回波位置有明显滞后,且幅值远低于实验结果。以下对声速、时域衰减系数进行进一步定量分析。

3.1.2 声速

采用渡越时间法对样品纵波声速进行测量,公式如下:

$$c_L = \frac{2d}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

式中, d 为样品厚度,mm, t_1 、 t_2 分别为表面与底面回波时间,s。

计算得到MBCT的仿真声速为2839 m·s⁻¹,Voronoi模型仿真声速2769 m·s⁻¹,二者与实验声速值(2848 m·s⁻¹)之间的相对误差分别为0.32%和2.77%。

3.1.3 时域衰减系数

超声时域衰减系数 α_s 是超声波在介质中传播单位距离的衰减量,其计算公式如下:

$$\alpha_s = \frac{10}{d} \left[\lg \left| \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_{sw} R_{sw} T_{ws}}{R_{ws}} \right| \right] \quad (8)$$

式中, P_1 为样品表面回波峰值, P_2 为样品底面回波峰值, R 为声压反射系数, T 为声压透射系数,下标 w 为水,下标 s 为样品, sw 表示声波从样品入射到水, ws 表示声波从水入射到样品。

计算得到MBCT和Voronoi模型的时域衰减系数分别为0.3893 dB·mm⁻¹和0.5232 dB·mm⁻¹,与实验测得的衰减系数值0.3849 dB·mm⁻¹之间的相对误差分别为1.14%和35.93%。比较可知,MBCT的仿真衰减结果与实验值之间更为接近,而在Voronoi模型的仿真中,超声波的衰减出现较为严重的“失真”,与实验之间的相对误差超过三分之一。

3.2 频域分析

对MBCT与Voronoi模型的仿真时域信号分别进行傅里叶变换,图7给出了仿真与实验的幅度谱结果。对比可知,MBCT仿真频谱中主频幅值与实验结果之间的相对误差仅为0.92%,Voronoi模型主频幅值远低于与实验值,相对误差达到20.70%。该结果与两种模型时域衰减系数的对比情况相吻合。两种

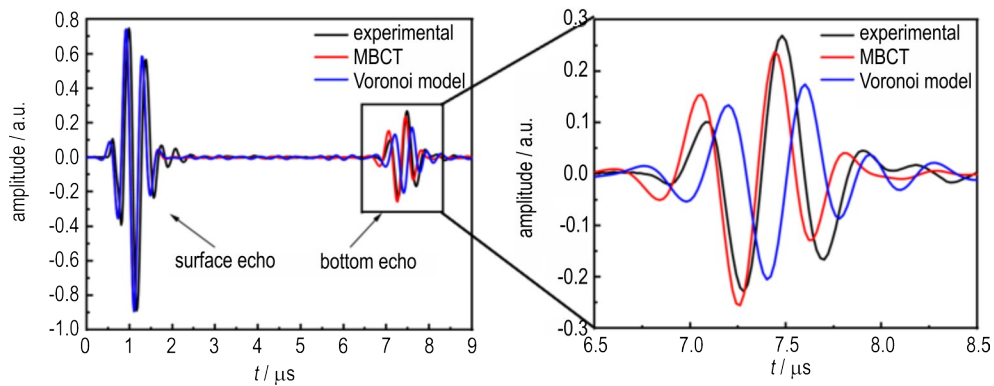


图6 超声时域信号数值模拟与实验对比

Fig.6 Numerical simulation and experimental comparison of ultrasonic time domain signal

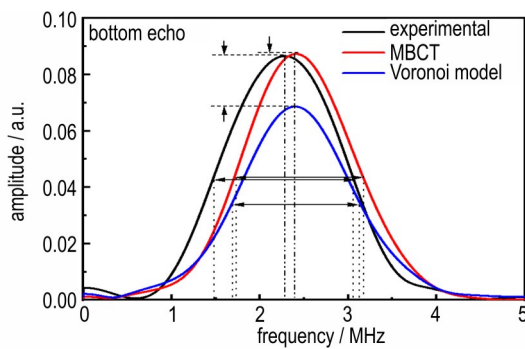


图7 实验与仿真信号幅度谱

Fig.7 Amplitude spectrum of simulation and experimental signal

模型仿真得到的主频非常接近,均略高于实验结果,其原因是超声仿真过程中将造型粉颗粒相与粘结剂相进行了各向同性简化,导致对声波频率的过滤作用减小,主频偏移(0.11 MHz)相比实验(0.18 MHz)偏小。

3.3 背散射结果分析

PBX材料内部主要由造型粉颗粒和黏结剂组成,前者尺寸范围为0.8~1.5 mm,造型粉与黏结剂之间的

声阻抗比值约为1.3,由此导致超声波在样品中传播时会存在明显的散射现象。图8给出了MBCT和Voronoi模型仿真及实验的背散射信号,可以看出,MBCT仿真的幅值与实验结果比较接近,Voronoi模型的幅值高于实验值, $t=2.5\sim 3.5\ \mu\text{s}$ 之间,MBCT的幅值较实验结果偏低,而 $t=5.2\sim 6.5\ \mu\text{s}$ 之间,Voronoi模型的幅值偏高更为明显。

常用表观积分背散射系数 $AIB^{[18]}$ 来量化表征背散射情况,其计算公式如下:

$$AIB = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} 8.68 \ln \frac{S_s(f)}{S_r(f)} df \quad (9)$$

式中, f_{\max} 、 f_{\min} 分别为探头带宽频率的极大值与极小值, $S_s(f)$ 对应该信号测量区域内的平均能量谱, $S_r(f)$ 为参考信号能量谱。本研究中取样品表面回波信号作为参考信号。

计算得到MBCT和Voronoi模型的表现背散射积分系数 AIB 的数值,分别为-40.17和-34.14,二者与实验测得的 AIB 值-39.55之间的相对误差分别为1.55%和13.68%。显然,MBCT的仿真结果与实验之间的误差远低于Voronoi模型。

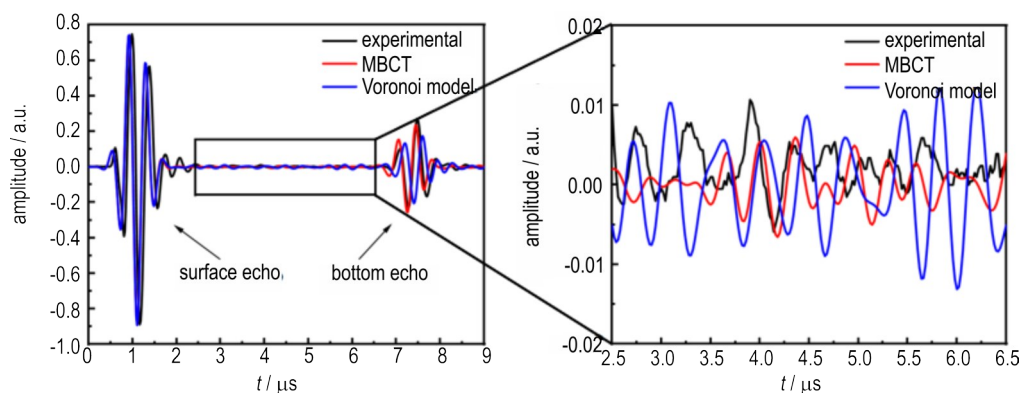


图8 实验与仿真的超声背散射信号

Fig.8 Ultrasonic backscatter signals of experiment and simulation

3.4 模型误差及声散射机制分析

对比两种模型仿真得到的声学参数与实验值之间的相对误差,如图9所示。可以看出,无论从声速、时域衰减系数、主频幅值还是表观积分背散射系数来看,MBCT仿真结果相对误差均小于2%,而Voronoi模型除声速外,与衰减相关的其余3个声学参数仿真结果与实验值之间均存在较大误差,其中时域衰减系数值相对误差高达35.93%。以下进一步从模型结构特征、超声传播时序、超声参量主要影响因素等方面定量分析MBCT超声仿真误差得到大幅度降低的内在机制和原因。

结构特征方面,MBCT与Voronoi模型的主要区别在于PBX造型粉颗粒形状及边界形态特征的差异,由图5可以看出,MBCT基于CT图像构建颗粒及边界形态,能够刻画其细观尺度上的随机复杂结构特征,而

Voronoi模型中颗粒边界平直,且棱角分明,这些差异对声波的传播会产生显著影响。

超声传播时序方面,图10对比了MBCT和Voronoi模型的超声波时序。可以看出,超声波入射至样品内部($t=1.02 \mu\text{s}$)时,初始声压保持相同。随着超声波的传播,直至到达底面产生反射,整个过程中MBCT仿真时序图中的散射均弱于Voronoi模型(见图10中白色虚线矩形框),说明Voronoi模型仿真高估了造型粉颗粒和黏结剂组成的两相结构的散射衰减,而MBCT较为完整地还原了造型粉和黏结剂真实边界特征,使得超声在边界处的反射、散射情况与实际声传播更为接近,所以仿真结果与实验更趋一致。

分析超声传播特性参量的主要影响因素。超声波在介质中的传播速度主要取决于弹性模量、泊松比和密度,受颗粒形状和边界形态的影响较小,MBCT与Voronoi模型在材料弹性参数与密度上设置的数值相同,因此两种模型仿真得到的声速值与实验值之间的误差均小于3%。衰减情况则明显不同,超声波衰减主要受界面声阻抗差异、散射体形状、散射体尺寸与波长之间的比值等因素影响。本研究中超声波波长 λ 约为1.12 mm,造型粉颗粒直径范围0.8~1.5 mm,波长与散射体尺寸相当,由公式(2)可知,超声波在PBX中以随机散射为主,MBCT颗粒及边界形态在细观尺度上呈现随机复杂特点,与实际情况更为接近,因此基于该模型仿真得到的时域衰减系数等参数数值与实验值之间的误差小于2%。而Voronoi模型过于简化,颗粒形态规则且边界棱角突出,高估了超声波衰减程度,仿真得到的时域衰减系数等参数数值均与实验值误差高达35.93%。

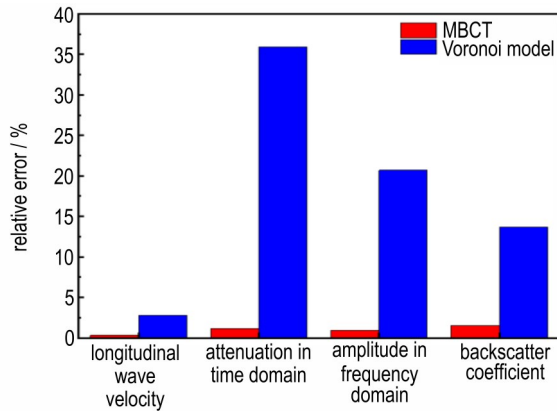


图9 MBCT与Voronoi模型相对误差对比
Fig.9 Comparison of relative error between MBCT and Voronoi model

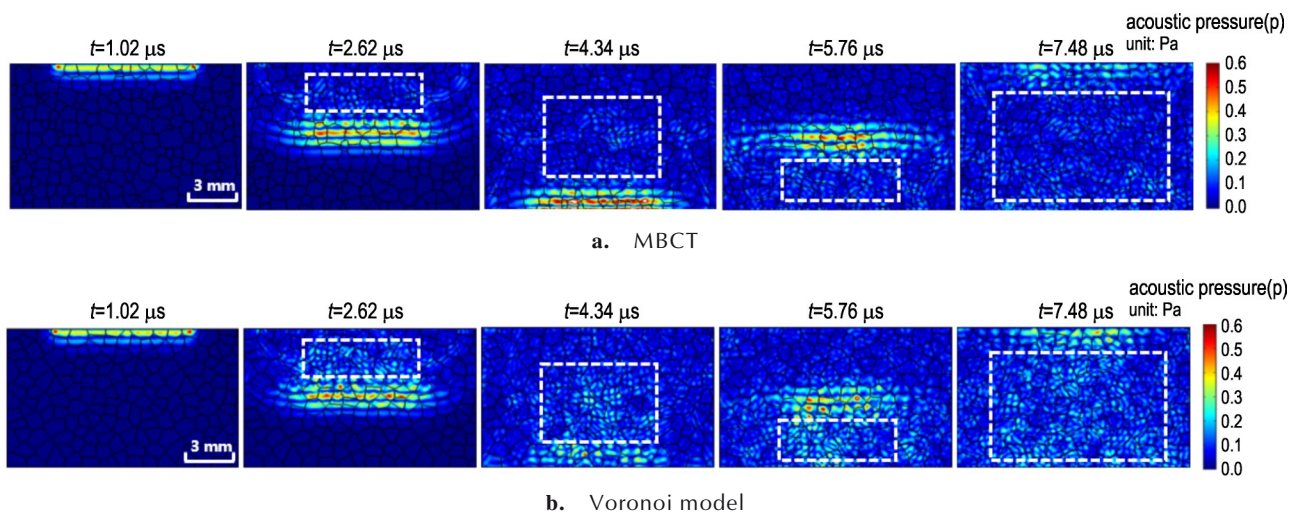


图10 MBCT与Voronoi模型超声仿真时序图
Fig.10 Ultrasonic simulation sequence images for MBCT and Voronoi model

4 结论

(1) 研究基于CT图像建立的细观结构模型MBCT中包含了TATB颗粒和黏结剂随机复杂边界特征, 在模拟超声传播时准确性高于Voronoi等边界较规则的模型。

(2) MBCT与Voronoi模型在相同材料参数下, 两种模型仿真得到的声速值与实验值之间的误差均分别为0.32%和2.77%, 说明颗粒边界形态对PBX这类材料的声速影响较小。

(3) MBCT保留了颗粒边界信息, 仿真得到的时域衰减系数、主频幅值以及表观积分背散射系数值与实验值之间误差均小于2%, 相比Voronoi模型大幅降低, 表明颗粒边界形态特征对超声衰减参量的影响显著。

参考文献:

- [1] 王延珺, 邹翔, 潘兵, 等. 基于数字体图像相关法的TATB基PBX材料内部变形测量[J]. 含能材料, 2022, 30(12): 1272-1281.
WANG Yan-jun, ZOU Xiang, PAN Bing, et al. 3D Deformation measurement in TATB based PBX based on digital volume correlation with μ -Computed tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(12): 1272-1281.
- [2] 董天宝, 袁洪魏, 文乾乾, 等. 准静态加载下HMX基PBX断裂行为的温度效应[J]. 含能材料, 2023, 31(5): 440-447.
DONG Tian-bao, YUAN Hong-wei, WEN Qian-qian, et al. Temperature effects on the fracture behavior of HMX based PBX under quasi-static loading[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(5): 440-447.
- [3] 黄辉, 黄亨建, 王杰, 等. 安全弹药的发展思路与技术途径[J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1079-1087.
HUANG Hui, HUANG Heng-jian, WANG Jie, et al. Development ideas and technical approaches for safety ammunition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(10): 1079-1087.
- [4] 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): 107-116.
Li Hai-Ning, Yu Li-Da, Gan Ren-Jie, et al. High signal-to-noise-ratio ultrasonic imaging of crack defects in particles filled composite explosives[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(15): 107-116.
- [5] 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.
- [6] PAN Q, LI S, LIU Y, et al. Meso-simulation and experimental research on the mechanical behavior of an energetic explosive[J]. *Coatings*, 2021, 11(1): 64.
- [7] PARK H. Study on characteristics of shock sensitivities of pressable plastic-bonded explosives (PBXs) applying multimodal particle system[J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2017, 21(4): 96-106.
- [8] BANERJEE B. Effective elastic moduli of polymer bonded explosives from finite element simulations[J]. *Physics*, 2005. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0510367>.
- [9] XIAO Y, FAN C, WANG Z, et al. Visco-hyperelastic constitutive modeling of the dynamic mechanical behavior of HTPB casting explosive and its polymer binder[J]. *Acta Mechanica*, 2020, 231: 2257-2272.
- [10] 王竞成. 高聚物粘结炸药力学性能的细观预测方法[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
WANG Jing-cheng. Study on the micromechanical methods to predict the mechanical property of polymer bonded explosives[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [11] 王竞成, 罗景润. 基于Voronoi细观数值模型预测PBX的有效弹性模量[J]. 含能材料, 2017, 25(7): 546-551.
WANG Jing-cheng, LUO Jing-run. Predicting the effective elastic modulus of PBX based on Voronoi meso-scale numerical model[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(7): 546-551.
- [12] 王竞成, 罗景润. 不同细观力学方法预测高聚物粘结炸药有效模量的比较[J]. 兵工学报, 2017, 38(6): 1106-1112.
WANG Jing-cheng, LUO Jing-run. Comparison of effective moduli of polymer bonded explosive predicted by different micromechanical methods[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(6): 1106-1112.
- [13] 张伟. AISi-polyester封严涂层孔隙率和组织均匀性超声表征原理及方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHANG Wei. Research on Principle and Method for Ultrasonic Characterization of Porosity and Microstructure Uniformity in AISi-polyester Coating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [14] 吴未, 陈华, 戴斌, 等. 基于CT图像的高聚物黏结炸药颗粒边界勾勒算法[J]. 含能材料, 2021, 29(1): 7-12.
WU Wei, CHEN Hua, DAI Bin, et al. A Granule Boundary Extraction Algorithm for X-ray CT Images of TATB-based Polymer Bonded Explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(1): 7-12.
- [15] 杨雪海, 张伟斌, 杨仍才, 等. 复杂构型PBX截面密度分布CT测试方法[J]. 含能材料, 2016, 24(6): 609-613.
YANG Xue-hai, ZHANG Wei-bin, DAI Bin, et al. CT Test method for the cross-section density distribution of PBX component with complex configuration[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(6): 609-613.
- [16] 周红萍, 庞海燕, 温茂萍, 等. 3种粘结剂材料的力学性能对比研究[J]. 材料导报, 2009, 23(24): 34-36+52.
ZHOU Hong-ping, PANG Hai-yan, WEN Mao-ping, et al. Comparative studies on the mechanical properties of three kinds of binders[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(24): 34-36+52.
- [17] 葛丝雨. 高聚物基颗粒复合材料力学性能的微观-细观多尺度模拟[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
GE Si-yu. The micro-meso multiscale simulation of mechanical

properties for polymer matrix particle composites[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.

[18] BI D, SHI L, LI B, et al. The protocol of ultrasonic backscatter measurements of musculoskeletal properties [J]. *Phenomics*, 4, 2024(4): 72–80.

Simulation Method Based on CT Image Modeling for the Ultrasonic Detection of TATB-based PBX

LI Zhi-feng^{1,2}, LIN Li¹, ZHANG Wei-bin², ZHAO Wen-xia¹, MA Zhi-yuan¹, LI Hai-ning²

(1. NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to break through the current limitation of simulation accuracy for the ultrasonic detection of TATB based PBX and to realize the structure-performance relationship based nondestructive ultrasonic testing and characterization, an ultrasonic simulation method based on CT image modeling (MBCT) was proposed. Using the significant difference of gray-level distribution between the particle phase and the binder phase in CT images, the structural morphology and features of the sample were extracted. A two-dimensional geometric structure model containing molding powder particles and boundary morphology was obtained by processing the CT slice image with noise reduction, binarization and boundary optimization. Then, the model was used for finite element simulation of ultrasonic propagation, and the differences between MBCT and conventional Voronoi model were quantitatively compared. Results show that the MBCT can effectively and precisely describe the random complex structure characteristics of TATB particles and boundary morphology, which makes the ultrasonic simulation results have better consistency with the experiment ones. The errors of sound velocity, attenuation, frequency domain amplitude and apparent integrated backscattering (AIB) coefficient were 0.32%, 1.14%, 0.92% and 1.55%, respectively (within 2%). Compared with Voronoi model (2.77%, 35.93%, 20.70%, 13.68%), the error is greatly reduced, and the simulation accuracy is significantly improved.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); CT images; ultrasonic testing; simulation model

CLC number: TJ55; TB55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024089

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 52105566)

(责编: 高毅)