

# 基于微波时间反演和GPU加速的蜂窝 复合材料损伤检测

孙凯<sup>1</sup>, 穆潇涵<sup>2</sup>, 李长侑<sup>1\*</sup>

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710029; 2. 布里斯托大学 工程学部, 布里斯托 BS8 1TH)

**摘要:** 蜂窝复合材料的生产和使用过程中可能会出现基体开裂、纤维断裂、分层和脱粘等损伤, 这些损伤会影响蜂窝材料的性能。微波时间反演算法具有无接触、实时高效等优点, 可以用于复合材料内部损伤检测。针对微波时间反演算法在面对大尺寸目标和多尺度计算时存在检测速度慢、效率低等问题, 将图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)并行的微波时间反演算法用于多尺度蜂窝材料的内部脱粘、空洞损伤检测与成像, 讨论了波源的脉冲宽度对损伤检测成像质量的影响, 分析了微波时间反演算法对材料中不同位置、不同深度的损伤检测结果。数值结果证明微波时间反演成像算法对具有复杂结构的蜂窝材料内部损伤具有良好的检测效果, 且GPU并行的微波时间反演成像算法达到了75.1倍的加速比。

**关键词:** 蜂窝复合材料; 微波检测; 时间反演; GPU计算

**中图分类号:** O441.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025089

**引用格式:** 孙凯, 穆潇涵, 李长侑. 基于微波时间反演和GPU加速的蜂窝复合材料损伤检测[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 615-622.

SUN Kai, MU Xiaohan, LI Changyou. Damage detection of honeycomb composites based on microwave time reversal and GPU acceleration[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 615-622.

## Damage Detection of Honeycomb Composites Based on Microwave Time Reversal and GPU Acceleration

SUN Kai<sup>1</sup>, MU Xiaohan<sup>2</sup>, LI Changyou<sup>1\*</sup>

(1. College of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China;

2. Faculty of Engineering, University of Bristol, Bristol BS8 1TH, UK)

**Abstract:** Damage such as matrix cracking, fiber breakage, delamination, and debonding may occur during the production and use of honeycomb composite materials. These defects compromise the performance of honeycomb structures. Microwave time reversal offers advantages including non-contact operation and real-time efficiency, making it suitable for detecting internal damage in composites. To address the issues of slow detection speed and low efficiency in conventional microwave time reversal, this study employs GPU-accelerated microwave time reversal for internal damage detection and imaging in multi-scale honeycomb materials. The impact of pulse width on damage detection and imaging quality is discussed. The effectiveness of microwave time reversal in detecting damage at different locations and depths within the

收稿日期: 2025-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62171376)

作者简介: 孙凯(1997-), 男, 博士生, 主要从事电磁场与微波技术研究。E-mail: kai.sun@mail.nwpu.edu.cn。

\* 通信作者: 李长侑(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电磁场与微波技术研究。E-mail: changyou.li@nwpu.edu.cn。

material is analyzed. Numerical results demonstrate that the microwave time reversal achieves excellent detection performance for internal damage within complex-structured honeycomb materials. Furthermore, the GPU-accelerated microwave time reversal achieves an acceleration ratio of 75.1.

**Key words:** honeycomb composites; microwave inspection; time reversal; GPU computing

## 0 引言

蜂窝复合材料是由芳纶纤维、牛皮纸、玻璃纤维等纤维材料作为蜂窝芯,金属、聚合物、陶瓷等作为基质材料构成的高性能复合材料<sup>[1]</sup>。该复合材料因其优异的强度、更高的刚度重量比、低相对密度和耐腐蚀性等优点,在航空航天和国防工业等领域中被广泛关注,具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。然而,蜂窝材料在生产和使用过程中,难以避免地会存在基体开裂、纤维断裂、分层和脱粘等损伤<sup>[4]</sup>。Liu等<sup>[5-7]</sup>基于高效建模方法对存在损伤的复合材料的电磁散射特性进行了研究,结果发现损伤会对蜂窝材料的结构产生影响,降低材料的强度与性能。因此,研究一种快速、高效、准确的蜂窝复合材料无损检测方法具有重要意义。

由于蜂窝复合材料常用于航空航天领域,具有制造成本高、结构特殊和使用环境特殊等特点,对无损检测技术的检测条件和检测要求更为严苛,包括不能使用耦合剂、检测空间狭小、材料结构复杂等。目前常用的无损检测技术包括超声检测技术<sup>[8]</sup>、微波检测技术<sup>[9]</sup>、红外热像技术<sup>[10]</sup>、散斑干涉技术<sup>[11]</sup>等。其中,微波检测技术具有无接触、实时高效等优点,对多种损伤都有较好的检测效果<sup>[12]</sup>。

微波时间反演算法的自适应聚焦特性<sup>[13]</sup>使其成为一种潜在的复合材料损伤检测技术。2021年,Mukherjee等<sup>[14]</sup>提出了一种结合多个辐射源的时间分辨信息进行复合材料损伤检测的微波时间反演算法,可以对复合材料中的平面型损伤进行检测,并通过仿真进行了验证。2024年,An等<sup>[15]</sup>使用微波时间反演成像算法对复合材料内部深层损伤进行检测,应用多种方法对损伤位置进行定位。数值仿真结果表明,微波时间反演算法对复合材料内部损伤具有良好的检测效果。

基于时域有限差分算法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)的微波时间反演算法对于多尺度计算问题及对大尺寸目标进行损伤检测时,存在计算量大、计算速度缓慢的问题,这严重影响了损伤检测的速度与效率。近年来,图形处理器

(Graphics Processing Unit, GPU)加速被广泛应用于FDTD计算。2015年,Francés等<sup>[16]</sup>提出了一种多GPU的FDTD方法二维方案,通过GPU间点对点的通信实现FDTD并行加速。2022年,Gunawardana等<sup>[17]</sup>提出了一种GPU加速的FDTD方法,用于求解与频率相关的传输线模型,并与CPU并行的FDTD方法进行了对比,结果表明GPU并行的FDTD算法具有更高的加速比。

本文基于三维FDTD对蜂窝复合材料进行数值仿真,使用微波时间反演算法对蜂窝材料内部的脱粘、空洞损伤进行检测,讨论了不同脉冲宽度对检测结果的影响,分析了微波时间反演算法对材料中不同位置、不同深度的损伤检测结果。针对微波时间反演成像算法在大尺寸模型与多尺度计算情况下对蜂窝复合材料内部细小损伤检测速度慢、效率低的问题,将GPU并行计算引入微波时间反演成像算法中,减少了微波时间反演成像算法在复合材料损伤检测中的时间开销,有效解决了微波时间反演成像算法在计算量较大的情况下不能实时高效检测损伤的问题,对材料内部损伤的快速微波检测具有重要意义。

## 1 方法论述

### 1.1 微波时间反演算法

微波时间反演算法的基本原理是波动方程在无耗和时不变介质中的时间反演不变性。无源区域的标量波动方程为<sup>[18]</sup>

$$\nabla^2 \phi(r, t) - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \phi(r, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

式中: $\epsilon$ 和 $\mu$ 分别为介电常数和磁导率。上述波动方程包含两个解,一个是描述脉冲源辐射出的发散波的解 $\phi(r, t)$ ,另一个是描述从空间中收敛至脉冲源位置处的收敛波的解 $\phi(r, -t)$ 。因此,在时间反转操作下,收敛波将会沿着发散波的传播路径在脉冲源的位置处实现自适应聚焦,这种自适应聚焦特性为实现损伤检测提供了理论基础。

### 1.2 损伤定位算法

时间积分能量法基于时间反演过程中的自适应聚焦特性,将时间反演过程中每一时刻的能量分布在时间上进行积分,则能量积分图像中最大能量的区域代表损伤真实位置。能量积分的表达式为<sup>[18]</sup>

$$W(x,y,z)=\int_0^T \frac{|E_z(x,y,z,t)|^2}{\eta(x,y,z)} dt, \quad (2)$$

式中:  $W(x,y,z)$ 为计算区域的能量积分结果分布;  $E_z(x,y,z,t)$ 为时间反演过程中每个时间步对应的场分布;  $\eta(x,y,z)$ 为计算区域的本征阻抗分布;  $T$ 为损伤检测的总时间。

## 2 数值仿真

### 2.1 蜂窝模型构建

为了贴合实际模型,保证计算的准确性,构建一种使用诺梅克斯(Nomex)作为蜂窝芯材料的精细蜂窝模型。Nomex是一种高性能的芳纶纤维材料。使用Nomex制作的蜂窝材料具有良好的韧性和抗损伤能力,且质量较轻,有足够高的压缩强度、剪切强度和良好的疲劳强度。这种蜂窝材料应用广泛,且多用于航空航天等重要领域,针对这类蜂窝材料的无损检测具有重要意义。Nomex蜂窝结构仿真模型如图1所示,其中正六边形蜂窝元胞长度为2 mm,壁厚为0.2 mm。

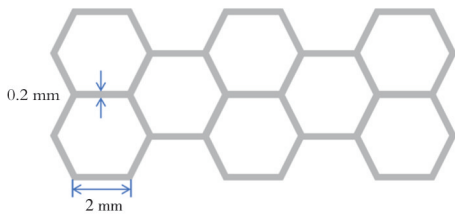


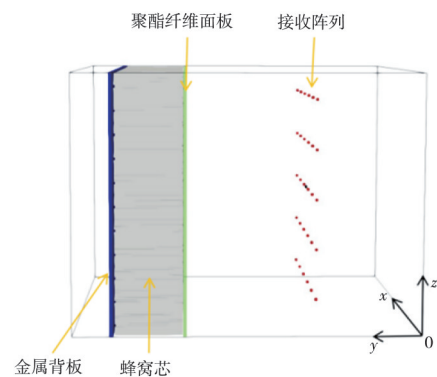
图1 蜂窝材料结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of honeycomb material structure

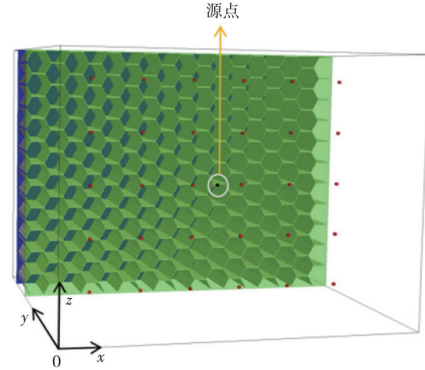
本节中的仿真模型如图2所示,图中黑色线条构成正方体代表计算区域。其中,FDTD网格尺寸  $\Delta x=\Delta y=\Delta z=0.1$  mm,时间步长  $\Delta t=0.166\ 668$  ps。整个计算区域大小为51.2 mm×51.2 mm×38.4 mm,划分的网格数量为512×512×384。在边界上使用单轴完美匹配层(Uniaxial Perfectly Matched Layer, UPML)来模拟无限大的计算区域。

图2(a)蜂窝材料模型由灰色的Nomex蜂窝芯、蓝色的金属背板与绿色的聚酯纤维面板组成。在

图2(a)的直角坐标系中,Nomex蜂窝芯的位置由(0 mm, 35 mm, 0 mm)至(51.2 mm, 45 mm, 38.4 mm),材料厚度为10 mm。金属背板的位置由(0 mm, 45 mm, 0 mm)至(51.2 mm, 45.5 mm, 38.4 mm),厚度为0.5 mm。聚酯纤维面板的位置由(0 mm, 34.5 mm, 0 mm)至(51.2 mm, 35 mm, 38.4 mm),面板厚度为0.5 mm。接收器阵列与聚酯纤维面板表面在y方向距离为20 mm,接收器阵列中接收器数量为30个,其位置如图中红色点所示。相邻两个接收器在z方向的距离为7.5 mm,x方向距离也为7.5 mm。源点发射器位于接收器阵列中心,如图2(b)的黑点所示,源点位置为(25.6 mm, 15 mm, 19.2 mm),用来激发调制高斯脉冲。



(a) 蜂窝材料模型



(b) 接收阵列示意图

图2 仿真模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation model

本文中所设置的损伤尺寸均为1 mm×0.5 mm×0.1 mm,仿真模型中的损伤设置如图3所示。

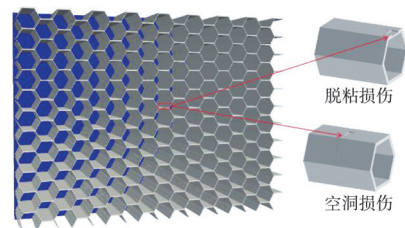


图3 蜂窝材料中不同类型损伤示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of different types of damage in honeycomb materials

当损伤位于蜂窝壁边缘与面板连接处时,该损伤可以模拟蜂窝与面板连接处的脱粘损伤。当损伤位于蜂窝壁内部时,该损伤可以模拟蜂窝内部空洞损伤。上述仿真模型中,材料与模拟损伤部分的介电常数与尺寸如表1所示。

表1 材料介电常数与空间尺寸

Tab. 1 Permittivity and spatial size of materials

	相对介电常数	空间尺寸/mm
Nomex蜂窝芯	2	51.2×10×38.4
聚酯纤维	4	51.2×0.5×38.4
空气(模拟损伤)	1	1×0.5×0.1

在微波时间反演算法中,通常使用微波脉冲信号作为激励源以实现有效聚焦。本文使用调制高斯脉冲作为激励源,表达式如式(3)所示<sup>[14]</sup>。

$$p(t) = \cos(2\pi f_0 t) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{t_w}}, \quad (3)$$

式中: $f_0$ 为中心频率,设置为20 GHz; $t_0$ 为时间延迟参数,设置为0.05 ps; $t_w$ 参数会影响波源的脉冲宽度。

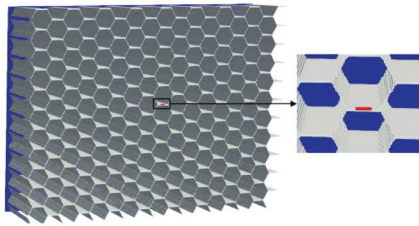


图4 脱粘损伤位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of de-adhesion damage location

在蜂窝材料中设置如图4所示的脱粘损伤。其中红色区域为损伤位置,损伤的位置由(25.5 mm, 35 mm, 20.7 mm)至(26.5 mm, 35.5 mm, 20.7 mm)。

## 2.2 损伤成像结果及分析

本文中的仿真计算使用Dell Precision 7920 Tower工作站完成,该工作站有两个2.1 GHz的Intel Xeon Gold 6230R CPU,共有52个计算核心,所配备的GPU NVIDIA RTX A6000具有48 G显存,满足计算需求。工作站所使用的操作系统为Ubuntu 24.04 LTS。

在微波时间反演算法中,使用能量积分法对损伤位置进行定位。针对上述仿真模型,为了突出损伤位置的检测结果,同时避免入射波在材料表面反射的能量积累对检测结果的干扰,因此只给出非金属材料区域的能量分布。

在时间反演算法中,脉冲宽度会影响纵向分辨率,最终直接影响对损伤的定位效果。将式(3)中影响脉冲宽度的参数 $t_w$ 分别设置为4、8、16 ps 3种情况,对应不同的脉冲宽度。将不同的波源用于蜂窝材料的损伤检测模型,损伤位置由(25.5 mm, 35 mm, 20.7 mm)至(26.5 mm, 35.5 mm, 20.7 mm),该损伤位置与图4所示的损伤位置相同。脉冲波源的时域波形与对应的二维能量积分结果如图5所示。

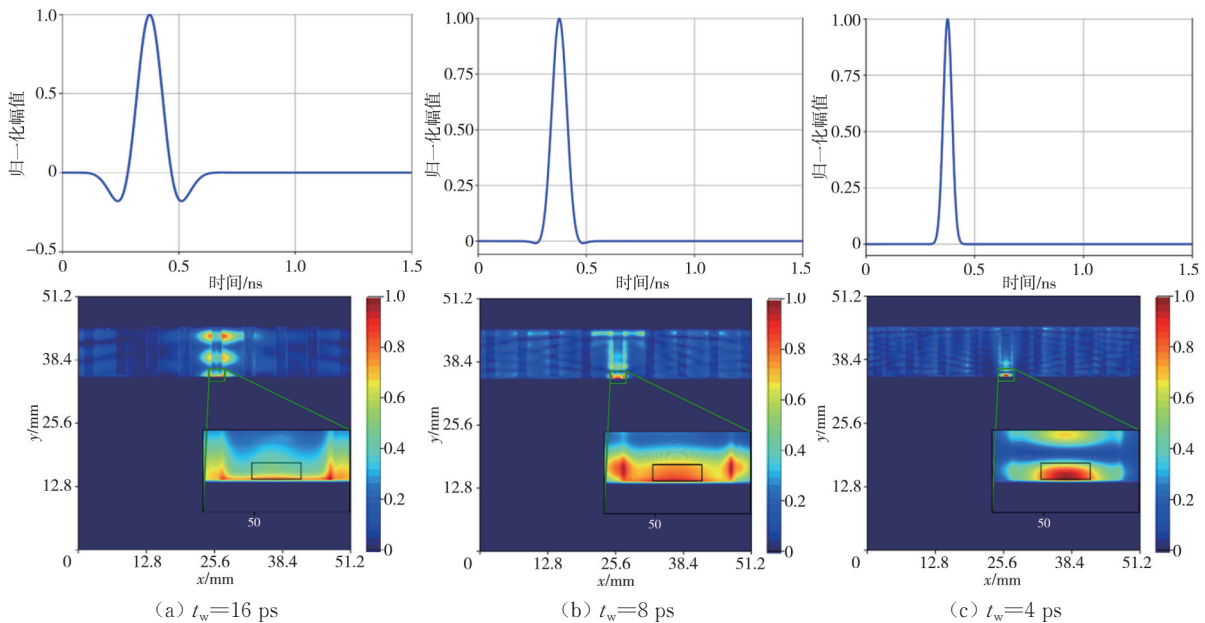


图5 不同脉冲信号时域波形与二维能量积分成像结果

Fig. 5 Time-domain waveforms of different pulse signals and 2D energy integration imaging results

从上述结果可以看出,当 $t_w=16$  ps时,脉冲在纵向上的宽度较大,能量未能在损伤处形成有效聚焦;当 $t_w=8$  ps时,能量聚焦于损伤位置处,但聚焦效果较差,能量未完全汇聚于损伤位置;当 $t_w=4$  ps时,聚焦效果良好,大部分能量聚焦在损伤位置处。由图 5 中能量积分结果可知,脉冲宽度的大小与聚焦尺寸的大小相关。如果脉冲宽度太大,能量会在除损伤外的其它地方形成干扰,不能在损伤处形成聚焦。当脉冲宽度与损伤尺寸能够较好匹配时,可在损伤处获得一个较好的聚焦效果。因此,针对上述仿真模型使用 $t_w=4$  ps的波源设置。在该设置下进行损伤检测,能量积分法能够有效在损伤处聚焦,获得质量较好的损伤定位效果。

为了探究微波时间反演成像算法对于不同位置、不同深度损伤的成像效果,考虑了两种情况:一种为内部损伤模型,代表位于材料内部区域存在损伤的情况;另一种为底部损伤模型,代表与金属背板邻近区域存在损伤的情况。

对内部损伤模型和底部损伤模型分别设置一个损伤,损伤的空间位置由表 2 给出,如图 6 所示,图中红色区域为损伤位置。

表 2 不同模型的损伤空间位置

Tab. 2 Damage spatial positions of different models

损伤模型	损伤空间位置
内部损伤模型	(25.5 mm, 40 mm, 20.7 mm)至(26.5 mm, 40.5 mm, 20.7 mm)
底部损伤模型	(25.5 mm, 44.5 mm, 20.7 mm)至(26.5 mm, 45 mm, 20.7 mm)

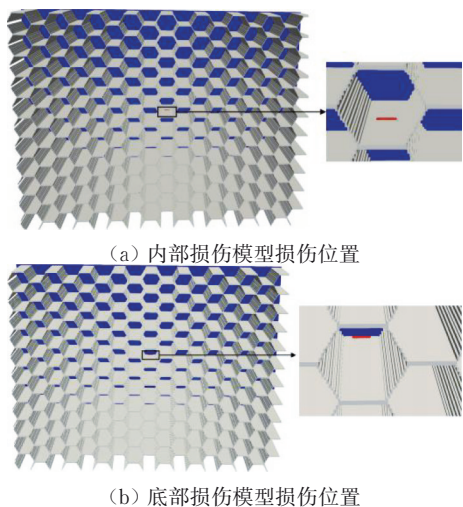


图 6 不同模型的损伤位置设置示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of damage location settings for different models

对于内部损伤模型,图 7(a)为其目标响应信号,同样具有两个峰值。该模型能量积分的二维截面如图 7(b) 所示。

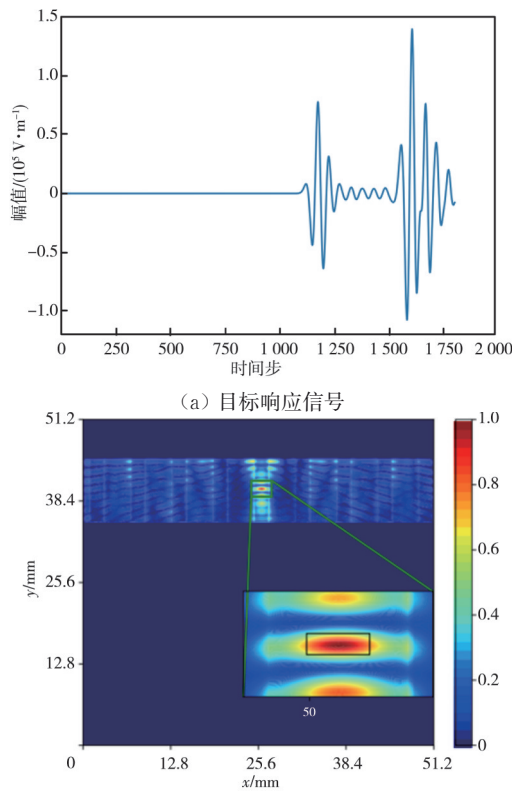
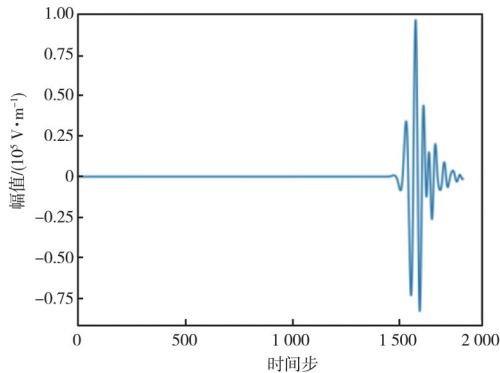


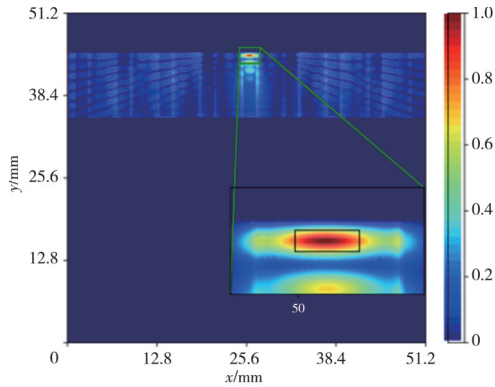
图 7 内部损伤模型

Fig. 7 Internal damage model

对于底部损伤模型,图 8(a)为其目标响应信号,该模型目标响应信号只有一个峰值,这是因为在这种情况下,损伤与金属背板反射的两个峰值信号在时间上有重叠。由于损伤位于金属板附近,当损伤反射的峰值出现时,金属背板反射的峰值立刻随之出现,因此目标响应信号只有一个峰值。该模型能量积分的二维截面如图 8(b) 所示。



(a) 目标响应信号

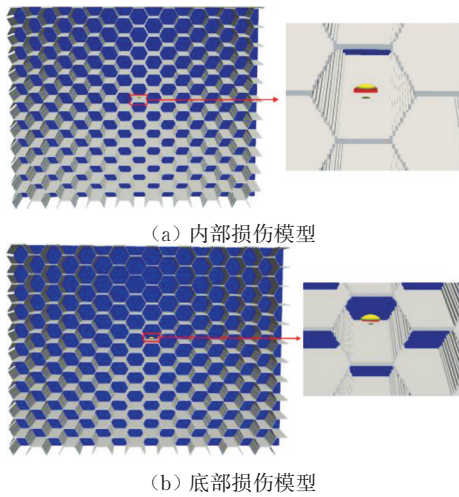


(b) 二维能量积分成像结果

图 8 底部损伤模型

Fig. 8 Bottom damage model

内部损伤模型与底部损伤模型的三维能量积分结果如图 9 所示。



(a) 内部损伤模型

(b) 底部损伤模型

图 9 损伤模型三维能量积分成像结果

Fig. 9 3D energy integral imaging results of damage model

由三维能量积分结果可以看出,微波时间反演成像算法对蜂窝材料的内部损伤与底部损伤具有良好的检测效果,能量在代表损伤的红色区域聚焦,位于金属板附近的底部损伤也可以被准确地定位。

对于材料中存在多个损伤的情况,将尺寸相同的两个损伤设置于材料中的不同位置,探究在多损伤情况下的损伤检测性能。构建如图 10 所示的多损伤模型,两个损伤的空间位置分别为  $(19.5 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 20.7 \text{ mm})$  至  $(20.5 \text{ mm}, 35.5 \text{ mm}, 20.7 \text{ mm})$  以及  $(31.5 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 20.7 \text{ mm})$  至  $(32.5 \text{ mm}, 35.5 \text{ mm}, 20.7 \text{ mm})$ 。损伤的空间位置如图 10 所示。

对于多损伤模型,图 11(a) 为其目标响应信号,由于两个损伤距离源点处接收器的距离相近,因此来自两个损伤的反射信号在源点处接收器有所重叠,目标响应信号只显示两个峰值。该

模型能量积分的二维截面如图 11(b) 所示。三维能量积分结果如图 12 所示。

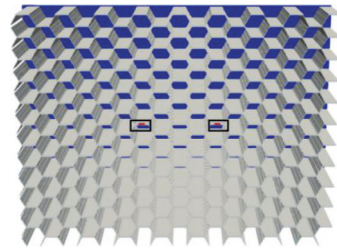
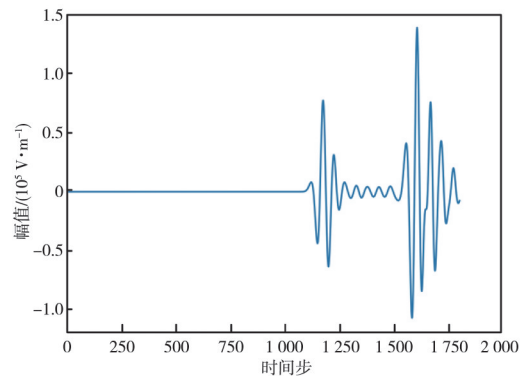
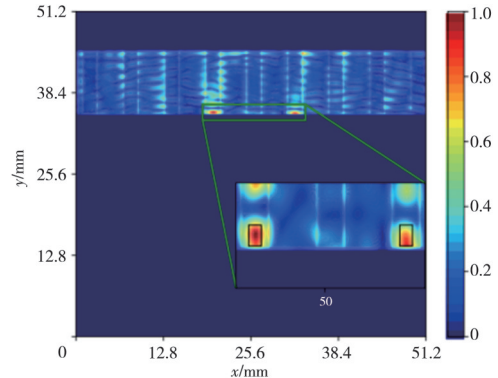


图 10 多损伤模型中损伤的空间位置

Fig. 10 Spatial positions of damages in multi-damage model



(a) 目标响应信号



(b) 二维能量积分成像结果

图 11 多损伤模型

Fig. 11 Multi-damage model

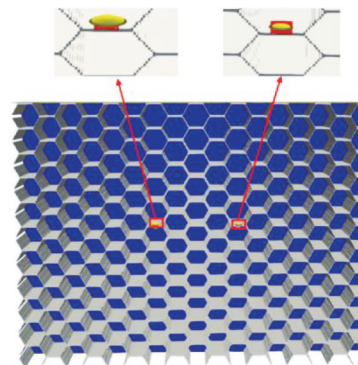


图 12 多损伤模型三维能量积分成像结果

Fig. 12 3D energy integral imaging results of multi-damage model

由图 12 可以看出,能量会在两个损伤位置处聚焦,准确地定位损伤位置。而左侧损伤的能量聚焦区域大于右侧损伤,这是因为源点位置更靠近左侧损伤,因此左侧能量积分的数值更大,导致能量聚焦区域更大。能量积分的结果表明,在蜂窝材料中存在多个损伤的情况下,微波时间反演算法依旧具有良好的检测效果。

### 2.3 并行加速效率

对于上述多尺度蜂窝材料模型,使用GPU并行的微波时间反演算法进行计算。蜂窝材料仿真模型剖分的网格数量为 $512 \times 512 \times 384$ ,仿真时间步数为1 800步。本节给出使用GPU RTX A6000并行的微波时间反演算法与串行算法对上述模型进行损伤检测的时间开销,计算并行算法的加速比。串行算法同样使用Dell Precision 7920 Tower工作站完成,该工作站具有两个2.1 GHz的Intel Xeon Gold 6230R CPU。计算时间如表3所示,对于上述计算量较大的多尺度蜂窝材料模型进行损伤检测,使用GPU并行的微波时间反演算法相较于串行算法极大减少了时间开销。GPU并行算法获得了75.1倍的加速比,大幅度提升了微波时间反演算法的损伤检测与成像效率。

表3 CPU与GPU计算时间对比

Tab. 3 Comparison of CPU and GPU computing time

参数	CPU 串行	GPU 并行
计算时间/s	16 372.21	218.14

## 3 结 论

本文构建了多尺度蜂窝材料模型,使用GPU并行的微波时间反演算法对蜂窝材料在生产和使用过程中可能出现的脱粘、内部空洞损伤进行检测。在损伤检测过程中,讨论了微波时间反演算法中波源的脉冲宽度对损伤检测成像质量的影响,分析了微波时间反演算法对材料中不同位置、不同深度的损伤检测结果。数值结果证明,微波时间反演算法在合适的波源设置下,对蜂窝复合材料中的细小损伤具有良好的检测效果。通过能量积分法对材料中的损伤位置产生能量峰值聚焦,能够较为精准地定位材料内部不同位置、不同深度的损伤位置。对比GPU并行算法与CPU串行算法对多尺度蜂窝模型仿真计算的时间开销,GPU并行算法获得了75.1倍的加速比,有

效提升了算法计算效率。

### 参考文献:

- [1] AHMAD S, ZHANG J, FENG P, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): a critical review[J]. *Composite Structures*, 2020, 250: 112545.
- [2] WEI Y, TIAN D, WANG J, et al. An efficient method to compute EM scattering from target covered with honeycomb composite material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(7): 1210-1214.
- [3] LI C, ZHU Q, LÜ B, et al. A 3-D printed continuous carbon fiber-reinforced composite for highly effective microwave shielding [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(5): 758-762.
- [4] 郝威,李明,王珏,等. 复合材料芳纶蜂窝夹层结构件特殊缺陷检测[J]. *航空学报*, 2022, 43(7): 438-446.  
HAO Wei, LI Ming, WANG Jue, et al. Special defect inspection of composite aramid paper honeycomb sandwich structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(7): 438-446. (in Chinese)
- [5] LIU Z, LI C, LESSELIER D, et al. Electromagnetic modeling of damaged single-layer fiber-reinforced laminates[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 1855-1866.
- [6] LIU Z, LI C, LESSELIER D, et al. Fast full-wave analysis of damaged periodic fiber-reinforced laminates [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(7): 3540-3547.
- [7] ZHANG X, XU F, ZANG Y, et al. Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact [J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111882.
- [8] SINGH J P. Review of ultrasonic testing technique [J]. *International Journal in IT & Engineering*, 2014, 2(3): 1-14.
- [9] BRINKER K, DVORSKY M, AL QASEER M T, et al. Review of advances in microwave and millimetre-wave NDT&E: principles and applications[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, 378(2182): 20190585.
- [10] QU Z, JIANG P, ZHANG W. Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques[J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 3851.
- [11] 马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. *航空学报*, 2014, 35

- (7): 1787-1803.
- MA Baoquan, ZHOU Zhenggan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35 (7): 1787-1803. (in Chinese)
- [12] JU Y, SAKA M, UCHIMURA Y. Evaluation of the shape and size of 3D cracks using microwaves [J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 726-731.
- [13] CARMINATI R, PIERRAT R, DE ROSNY J, et al. Theory of the time reversal cavity for electromagnetic fields[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3107.
- [14] MUKHERJEE S, MAYS R O, TRINGE J W. A microwave time reversal algorithm for imaging extended defects in dielectric composites [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2021, 7: 1215-1227.
- [15] AN K, LI C, LONG G, et al. Microwave time reversal for nondestructive testing of buried small damage in composite materials [J]. *Inverse Problems*, 2024, 40 (4): 045006.
- [16] FRANCÉS J, OTERO B, BLEDA S, et al. Multi-GPU and multi-CPU accelerated FDTD scheme for vibroacoustic applications[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, 191: 43-51.
- [17] GUNAWARDANA M, KORDI B. GPU and CPU-based parallel FDTD methods for frequency-dependent transmission line models[J]. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2022, 4(3): 66-70.
- [18] MUKHERJEE S, UDPA L, UDPA S, et al. A time reversal-based microwave imaging system for detection of breast tumors [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67 (5): 2062-2075.