

引文格式: 付冬欣, 林莉, 张书宁, 等. 超声检测识别CFRP复合材料PTFE夹杂与富树脂缺陷[J]. 航空制造技术, 2024, 67(3): 83–88.
FU Dongxin, LIN Li, ZHANG Shuning, et al. Identification of PTFE inclusion and rich resin defects in CFRP composites by ultrasonic testing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(3): 83–88.

超声检测识别 CFRP 复合材料 PTFE 夹杂与富树脂缺陷

付冬欣, 林莉, 张书宁, 罗忠兵

(大连理工大学无损检测研究所, 大连 116024)

[摘要] 针对碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)缺陷试样制作困难且不同夹杂缺陷难识别的问题, 采用仿真与试验相结合的方法, 开展聚四氟乙烯(PTFE)夹杂与富树脂缺陷超声检测研究。首先建立考虑 CFRP 层结构弹性各向异性的多向层合板超声反射法有限元模型, 对比模拟与试验得到的 A 扫描时域信号, 证明了模型的有效性。在 CFRP 层合板内部设置宽度 6 mm, 厚度 0.03~0.40 mm 的 PTFE 夹杂和厚度 0.03~0.85 mm 的富树脂缺陷, 模拟得到超声 A 扫描信号, 分析比较两种缺陷厚度变化对超声信号幅值最大值和波形峭度因子的影响。结果显示, 随着缺陷厚度增加, PTFE 夹杂及富树脂缺陷信号的幅值最大值和峭度因子均呈现先上升后下降最后趋于稳定的趋势, 但富树脂缺陷信号幅值最大值低于 PTFE 夹杂, 其峭度因子随厚度变化滞后于 PTFE 夹杂。

关键词: 碳纤维增强复合材料(CFRP); 数值模拟; 缺陷识别; PTFE 夹杂; 富树脂

Identification of PTFE Inclusion and Rich Resin Defects in CFRP Composites by Ultrasonic Testing

FU Dongxin, LIN Li, ZHANG Shuning, LUO Zhongbing

(NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] The fabrication and identification of different inclusions are difficult in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates. In this paper, ultrasonic testing of inclusions, including artificial delaminations with Polytetrafluoroethylene (PTFE) and rich resin regions are studied by numerical simulation and experiment. Firstly, an ultrasonic reflection finite element model of multidirectional laminate considering elastic anisotropy of CFRP layers is established, and the time-domain signals of A-scan obtained by simulation and experiment are compared to prove the validity of the model. Then, PTFE inclusion with a width of 6 mm and thicknesses of 0.03–0.40 mm and rich resin defects with thickness of 0.03–0.85 mm are preset inside the CFRP laminate. The ultrasonic A-scan time-domain waveform of the defects is obtained by simulation, and the influences of the two kinds of defects thickness changes on the maximum amplitude and the kurtosis factor of ultrasonic signals are analyzed and compared. The results show that with increasing defect thickness, the maximum amplitude and kurtosis factor of defect signals both show a trend of first increasing, then decreasing and finally stabilizing. However, the maximum amplitude of rich resin defects is lower than that of PTFE inclusion, and the variation trend of rich resin defects kurtosis factor with thickness lags behind that of PTFE inclusion.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP); Numerical simulation; Defect identification; PTFE inclusion; Rich resin

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.03.083

碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 因具有高比强度、高比刚度、可设计性强和易成型等特性被广泛应用于航空航天领域^[1-3]。由于其制备工艺十分复杂导致材料内部不可避免会出现分层、孔隙、夹杂和富树脂等缺陷,严重影响结构件的稳定性和可靠性,采用无损检测的方法对复合材料进行质量检测至关重要^[4-6]。研究发现,不同的缺陷类型对材料性能的影响存在差异^[7-9],其中夹杂缺陷容易使材料产生应力集中,显著降低材料断裂韧性和剪切强度;富树脂缺陷通过改变材料占比与铺层厚度,削弱了材料的承载能力,材料易产生疲劳失效^[10],因此对其进行准确可靠的无损识别具有重要意义。

超声检测因具有检测灵敏度高、检测速度快,对身体无害等优点被广泛用于复合材料无损检测^[11-14]。在CFRP复合材料缺陷定性方面,目前主要围绕孔隙和分层缺陷进行研究^[15-18],例如王喆等^[15]采用脉冲反射法对厚度4 mm、孔隙率0.20%~5.92%的CFRP标准试块进行检测,提取缺陷超声背散射信号递归率和递归熵两种特征参数,对不同孔隙率区域进行了有效识别;李健等^[16]基于超声相控阵检测得到厚度5 mm的CFRP层合板不同尺寸分层、不同形状夹杂和自然脱粘缺陷超声检测信号,提取缺陷时域波形节点处波峰系数和波形系数作为缺陷识别特征;Meng等^[17]基于超声相控阵法获取厚度3.6 mm的CFRP层合板分层和孔隙缺陷超声检测信号,提取缺陷时域波形小波包系数并结合深度卷积神经网络对20 mm×20 mm分层和孔隙缺陷进行了有效识别。相比于孔隙和分层缺陷,对CFRP复合材料中夹杂与富树脂缺陷进行超声区分的研究非常少,其原因主要包括两方面:一是夹杂与富树脂缺陷尺寸和形状难以控制,试样制作困难;二是这两种缺陷材料特性相近,识别困难。

特别是由于CFRP层合板具有多层、各向异性的特点,超声波与层合板作用时存在层间反射,缺陷信号随机复杂,进一步增加了缺陷定性的困难,单纯从试验角度对复合材料缺陷定性效果不佳。

Zhang等^[19]基于相控阵超声检测技术,采用仿真与试验相结合的方法对波纹状复合材料分层和富树脂缺陷进行了有效表征,利用不同缺陷反射幅度对超声频率的依赖性,从不同滤波频率的B扫描图像中区分了分层和富树脂缺陷。

基于以上分析,本文采用试验与仿真结合的方法,基于超声反射法时域信号分析,开展CFRP复合材料PTFE夹杂与富树脂缺陷定性研究,通过分析不同厚度下两种缺陷时域信号差异,对PTFE夹杂与富树脂缺陷进行识别。

1 CFRP 复合材料层合板仿真建模

1.1 显微组织观测

本研究所用CFRP层合板由CCF300单向带预浸料和CF3031斜纹织物预浸料采用热压罐手糊工艺制成。图1为CFRP层合板示意图,该层合板尺寸为300 mm×300 mm,板厚3.66 mm,纤维铺层顺序为[45/45/0/45/90/45/0/45/90/0]_s。截取小块试样用于显微观测,其金相照片如图2所示,图2(a)为层合板纵截面微观组织,各叠层间存在较为明显的分界面,每一层均为纤维与树脂混合态,叠层厚度0.10~0.30 mm。图2(b)~(d)是取向为0°、45°、90°的纤维几何形态,其中纤维直径5~8 μm。

1.2 声学参数测量

由于纤维铺排方向性分布,CFRP复合材料整体表现出各向异性,可采用刚度矩阵来描述材料的弹性性能。本文基于超声浸液背散射法结合模拟退火算法进行参数反演^[20],得到CFRP单向板0°单向带和0°织

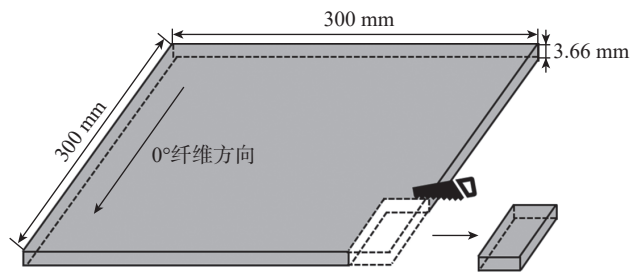


图1 CFRP层合板示意图

Fig.1 Schematic diagram of CFRP laminates

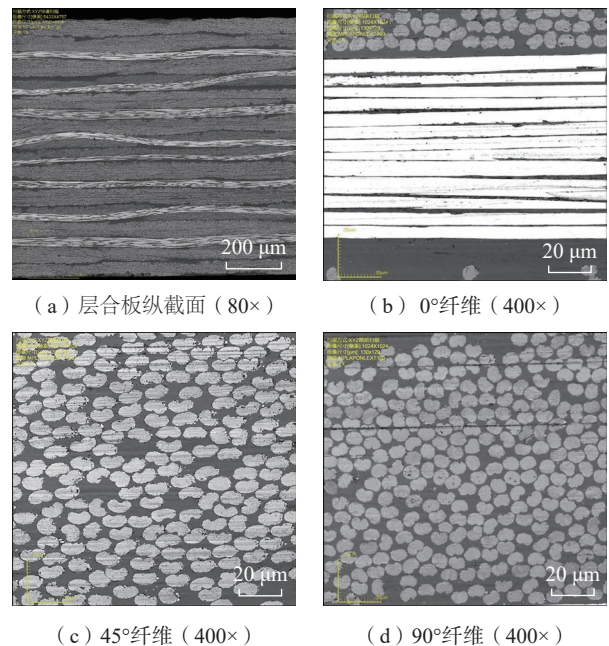


图2 CFRP层合板微观组织

Fig.2 Microstructure of CFRP laminates

物的弹性刚度矩阵,再利用 Bond 变换获取纤维取向为 45° 和 90° 的弹性刚度矩阵。采用阿基米德排水法测得试样密度为 1541.60 kg/m^3 。

1.3 声学建模

基于组织观测和材料声学特性测试结果,借助 COMSOL Multiphysics 5.3 软件建立 CFRP 层合板超声检测有限元仿真模型^[21],如图 3 所示。设置换能器中心频率 5.35 MHz、晶片直径 6.35 mm、采样频率 250 MHz、超声波脉冲宽度 $0.63 \mu\text{s}$ 。试样上方区域填充有机玻璃材料。设置边界为低反射边界,以便消除模型边界处超声波反射带来的影响。

基于上述模型,仿真得到 CFRP 层合板时域信号和瞬态声场,如图 4 所示。由图 4 (a)可知,表面波与底面波间存在层间反射波且波形随机复杂,通过图 4 (b)的瞬态声场分布也能观察到超声波在层合板叠层处发生了波的反射。分析原因主要是由于 CFRP 层合板叠层间纤维取向不一导致其声阻抗存在差异,超声波在传播时遇到多个异质界面,且层间距离较小,使得每个叠层间发生了多次界面反射。

1.4 试验验证

采用与模拟相同的参数条件对 CFRP 层合板进行超声检测,得到试验与仿真时域信号对比结果,如图 5 所示。可以看出,CFRP 层合板仿真信号表面波、层间反射波和底面波在位置和幅值上均与试验信号具有较高重合度。 $t=9.50\sim 13.20 \mu\text{s}$ 范围内仿真与试验信号均方根误差为 2.79%,证明了仿真模型的有效性。

2 夹杂与富树脂缺陷仿真识别

2.1 建模与仿真

基于 1.3 节中的模型,在 CFRP 层合板 11/12 层设置宽度为 6 mm,厚度 h 为 $0.03\sim 0.40 \text{ mm}$ 的聚四氟乙烯 (PTFE) 夹杂及厚度 $0.03\sim 0.85 \text{ mm}$ 的富树脂缺陷,材料声学参数见表 1。获取不同厚度 PTFE 夹杂与富树脂缺陷超

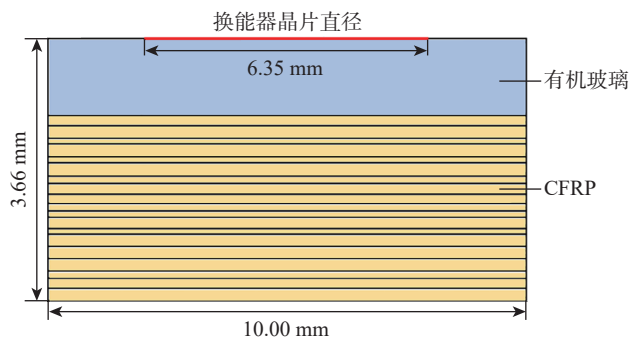


图 3 CFRP 层合板超声检测有限元模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element model for ultrasonic testing of CFRP laminates

声 A 扫描信号。选择厚度 0.10 mm 、 0.20 mm 和 0.30 mm 的 3 种缺陷时域信号进行比较,对比结果如图 6 所示。

观察完全区分缺陷上下表面回波时,PTFE 夹杂缺

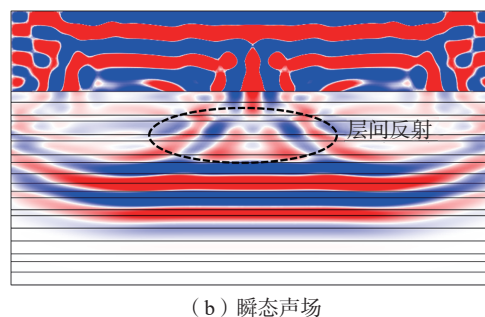
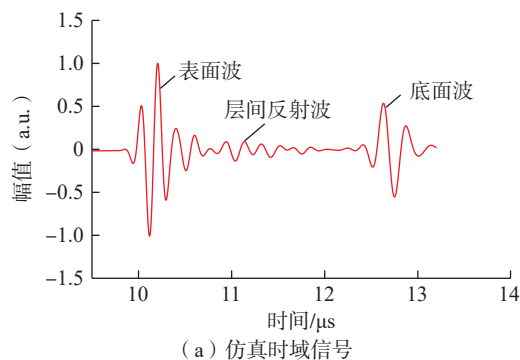


图 4 CFRP 层合板超声检测仿真结果

Fig.4 Simulation results of ultrasonic testing of CFRP laminates

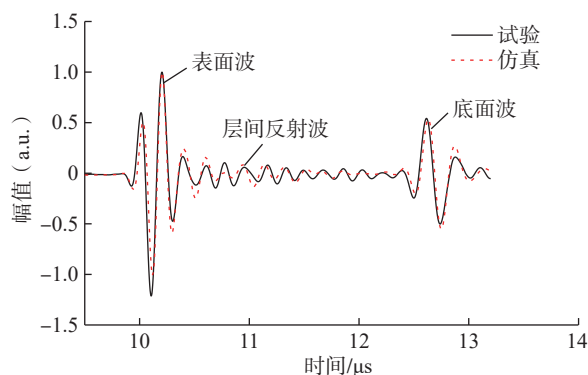


图 5 CFRP 层合板试验与仿真时域信号对比结果

Fig.5 Comparison of time-domain signals between simulation and experiment of CFRP laminates

表 1 材料声学参数

Table 1 Acoustic parameters of materials

材料名称	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	声速 $c/(\text{m/s})$	声阻抗 $Z/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	声压反射系数
CFRP 复合材料	1541.60	2922.19	4500.00×10^3	—
PTFE	2140.00	1205.00	2578.70×10^3	-0.27
环氧树脂 (EP)	1210.00	2679.89	3242.67×10^3	-0.16

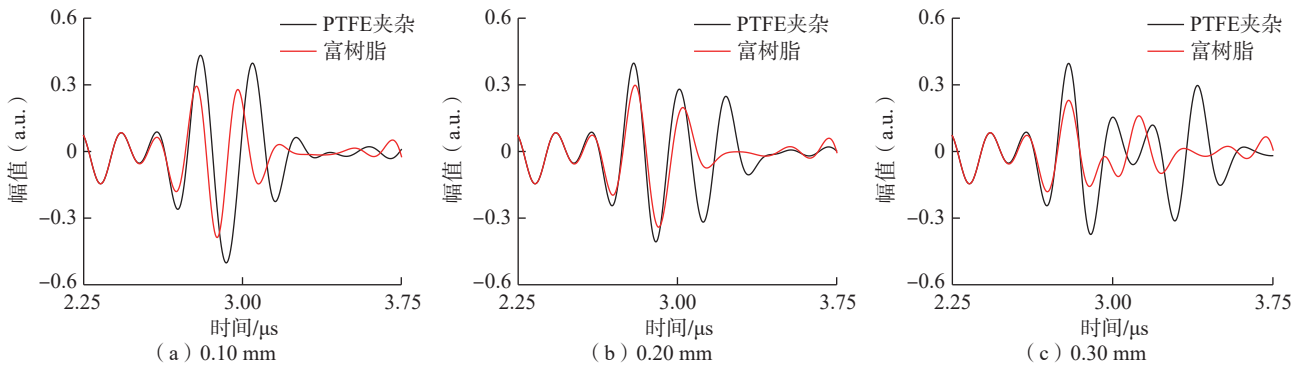


图6 不同厚度 PTFE 夹杂与富树脂缺陷超声仿真时域信号对比

Fig.6 Comparison of ultrasonic simulation time-domain signals of PTFE inclusions and rich resin defects with different thicknesses

陷和富树脂缺陷厚度分别不小于 0.38 mm 和 0.85 mm。观察图 6 可以发现,夹杂与富树脂缺陷时域信号整体上存在明显差异。主要表现为:(1)幅值不同。相同厚度时,富树脂缺陷在幅值上均低于夹杂缺陷。由超声检测原理可知,幅值反映了由界面声阻抗差引起的声压反射能力的强弱,根据表 1 可得,PTFE 与基体界面声压反射系数高,则 PTFE 夹杂缺陷反射能力更强。(2)波形不同。相同厚度的两种缺陷波形存在差异,而同一种缺陷不同厚度的波形也有明显区别。这主要是由于缺陷波发生了混叠。缺陷波混叠是由于超声波穿过缺陷上下表面时,声时差 Δt 小于超声波的脉冲宽度 D 从而造成的缺陷上下表面回波难以区分。根据表 1 中材料声速,计算得到能够完全区分缺陷上下表面回波时,PTFE 夹杂缺陷和富树脂缺陷厚度分别不小于 0.38 mm 和 0.85 mm。

2.2 分析与讨论

为了定量识别缺陷,提取超声时域波形中缺陷波幅值最大值 A_{\max} 和峭度因子 K 作为特征参数。峭度因子反映了超声时域信号的分布特征,即信号波形的平缓程度,其值根据时域信号中异常幅值分量的占比而改变,能够很好地反映缺陷信号的特征^[22-24]。图 7 为超声时域信号分布与峭度因子的关系,以信号的标准正态分布曲线作为基准,其 $K=3$; 当 $K<3$ 时,信号的分布曲线为负峭度;当 $K>3$ 时,则为正峭度。波形越平缓, K 越小。峭度因子 K 计算式^[24]为

$$K = \frac{E[X - \mu]^4}{\sigma^4} \quad (1)$$

式中, X 为缺陷信号; μ 为均值; σ 为标准差; $E[\]$ 为期望函数。

提取得到两种缺陷信号幅值最大值随缺陷厚度变化情况,如图 8 所示。可知,随着缺陷厚度增加,两种缺陷 A_{\max} 均存在波动,分析其原因是受到缺陷上下表面回波波形叠加的影响。当 PTFE 夹杂与富树脂缺陷厚度分别为 0.06 mm 和 0.14 mm 时,缺陷波 A_{\max} 达到最大,对应

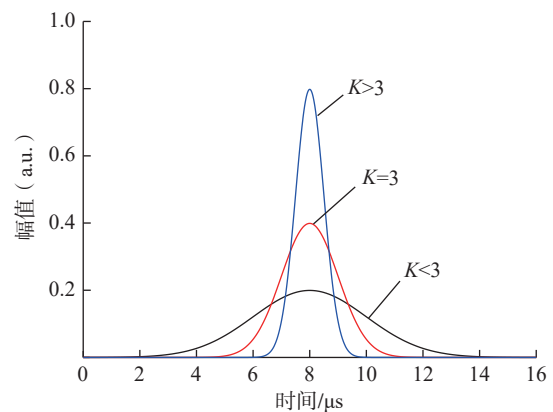
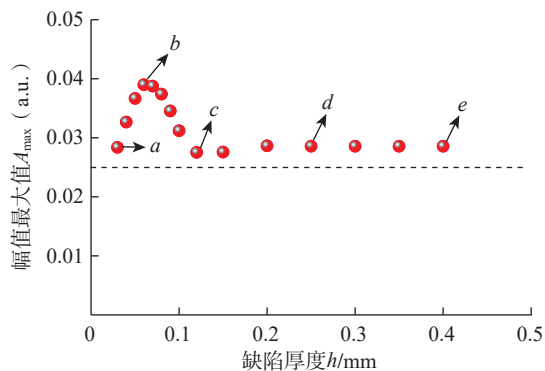


图7 超声时域信号分布与峭度因子的关系

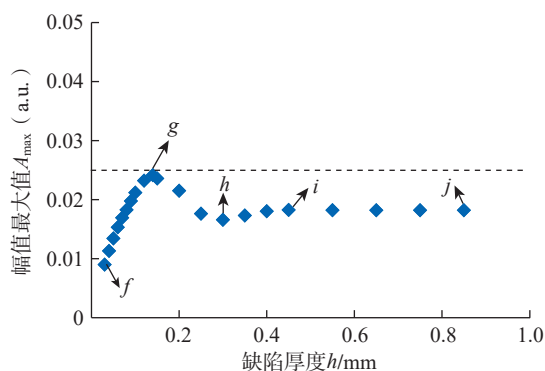
Fig.7 Relationship between ultrasonic time-domain signals distribution and kurtosis factor

图 8 (a) 中点 b 和图 8 (b) 中点 g , 此时缺陷上下表面回波叠加情况如图 9 所示。同时对比两种缺陷的 A_{\max} 可知,由于 PTFE 与基体间的界面反射能力较强,所设厚度范围内,PTFE 夹杂缺陷 A_{\max} 一直高于富树脂缺陷。

提取得到两种缺陷信号峭度因子随缺陷厚度变化情况,如图 10 所示。随着缺陷厚度的增加,两种缺陷峭度因子 K 变化趋势均为先上升后下降最后趋于稳定。分析可知,本研究中混叠波幅值最大值 A_{\max} 和缺陷上下表面回波声时差 Δt 均会影响缺陷的混叠波波形。两者分别从混叠波高度和宽度两个角度对波形的平缓程度产生影响,从而使 K 值发生变化。 Δt 相同时, A_{\max} 越大,波形越“高”, K 值越大; A_{\max} 相同时, Δt 越大,波形越“宽”, K 值越小。以 PTFE 夹杂缺陷为例,分段讨论不同厚度下 K 值的变化。 AB 阶段,由于 A_{\max} 的显著增加,缺陷混叠波波形变“高”趋势明显, K 值增加。 BCD 阶段,点 C 为 K 值下降速率显著变化点,对应图 8 (a) 中 c 点,此时 A_{\max} 到达极小值。 C 点之前,即 BC 阶段, Δt 增加和 A_{\max} 减小共同作用,缺陷波变得“宽”且“矮”, K 值迅速减小; C 点之后,即 CD 阶段, A_{\max} 小幅度上升



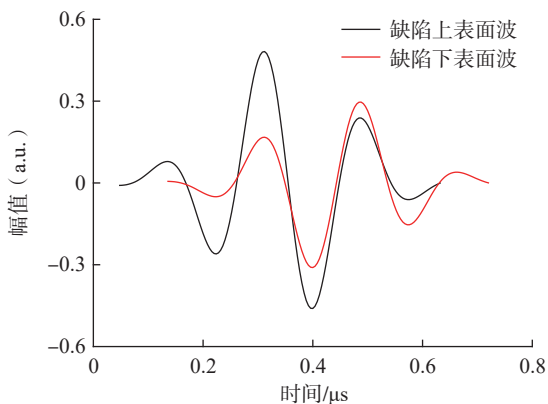
(a) PTFE夹杂缺陷



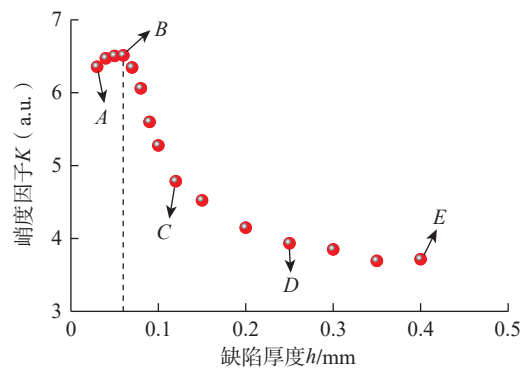
(b) 富树脂缺陷

图8 两种缺陷仿真时域信号幅值最大值与厚度的变化关系

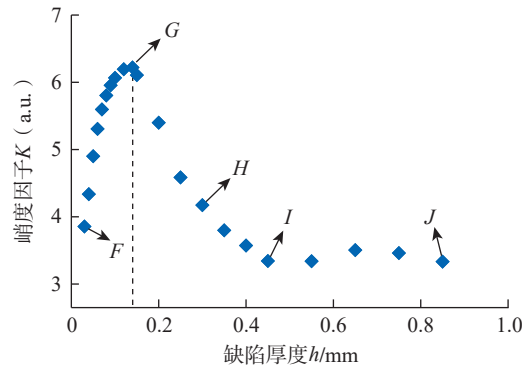
Fig.8 Relationship between maximum amplitude and thickness of two kinds of defect time-domain signals in simulation

图9 A_{\max} 最高点处缺陷上下表面回波叠加Fig.9 Superposition of upper and lower surface echoes of the defect at the highest point of A_{\max}

导致波形变缓趋势减慢, K 值变化速率减小。DE 阶段, 对应图 8 (a) 中 de 段, 此时 A_{\max} 基本保持不变, 受 Δt 影响, 混叠波波形变“宽”, K 值缓慢减小, 逐渐趋于稳定。富树脂缺陷信号峭度因子随缺陷厚度变化趋势与 PTFE 夹杂缺陷大致相同, 但由于富树脂声速较大, 相同缺陷厚度, $\Delta t_{\text{富树脂}} < \Delta t_{\text{PTFE 夹杂}}$, 因此, 相比于 PTFE 夹杂缺陷, 富树脂缺陷 K 值变化阶段整体向右移动, 如图 10 (b) 所示。



(a) PTFE夹杂缺陷



(b) 富树脂缺陷

图10 两种缺陷仿真时域信号峭度因子与厚度的变化关系

Fig.10 Relationship between kurtosis factor and thickness of two kinds of defect time-domain signals in simulation

由上述分析可知, PTFE 夹杂和富树脂缺陷的密度、声速存在差异, 对应不同缺陷厚度, 两种夹杂物的超声时域信号的幅值最大值和峭度因子变化存在一定差异。考虑到超声检测信号受缺陷深度、取向、形状等多种因素影响, 且实际操作中工件表面状态、探头耦合状况等都会给检测结果带来干扰, 缺陷定性还需结合复合材料制备工艺, 以及制件的结构特点等进行综合分析和研判。

3 结论

(1) 基于脉冲反射法, 建立了考虑 CFRP 层结构弹性各向异性的多向层合板有限元模型, 通过比较仿真与试验得到的 A 扫描时域信号, 证明了仿真模型的有效性。

(2) 仿真研究表明, 当 PTFE 夹杂缺陷厚度由 0.03 mm 增加到 0.40 mm, 富树脂缺陷厚度由 0.03 mm 增加到 0.85 mm 时, 缺陷信号幅值最大值 A_{\max} 先增加后降低最后趋于稳定, 峭度因子 K 变化趋势相近。

(3) 所设厚度范围内, 富树脂缺陷幅值最大值均低于 PTFE 夹杂, 其峭度因子随厚度变化趋势滞后于 PTFE 夹杂。

参考文献

- [1] NANNAN N I, KAI B, LU XIA, et al. Application of advanced composite materials for UAV[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(5): 45–60.
- [2] NARESH K, SHANKAR K, VELMURUGAN R, et al. Probability-based studies on the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 763–770.
- [3] ARAI M, CHIBA T, GOTO K, et al. Inverse analysis of interlaminar strength in CFRP laminates using pulse laser spallation method[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 214: 108938.
- [4] GHOLIZADEH S. A review of non-destructive testing methods of composite materials[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 1: 50–57.
- [5] LIZARANZU M, LARIO A, CHIMINELLI A, et al. Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 113–120.
- [6] 徐桂荣, 马腾飞, 李洋, 等. 先进树脂基复合材料层合结构纤维屈曲超声检测技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(21): 34–42.
- XU Guirong, MA Tengfei, LI Yang, et al. Research progress of ultrasonic testing and evaluation technology for fiber buckling defects of laminated structure of advanced resin matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(21): 34–42.
- [7] GHAYOOR H, MARSDEN C C, HOA S V, et al. Numerical analysis of resin-rich areas and their effects on failure initiation of composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 117: 125–133.
- [8] XU J Y, LI C, MI S P, et al. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1076–1087.
- [9] 陈霏. 孔隙影响碳纤维复合材料层合板力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- CHEN Fei. Study on the effect of porosity on the mechanical properties of carbon fiber composite laminates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [10] 胡勃. 基于递归分析的碳纤维复合材料微缺陷超声检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HU Bo. Research on ultrasonic detection technology of micro-defects in carbon fiber composites based on recursive analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [11] LIN L, CAO H Q, LUO Z B. Dijkstra's algorithm-based ray tracing method for total focusing method imaging of CFRP laminates[J]. *Composite Structures*, 2019, 215: 298–304.
- [12] 刘菲菲, 刘松平, 傅天航, 等. 复合材料T-形R区超声反射法检测与缺陷判别[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(5): 43–48.
- LIU Feifei, LIU Songping, FU Tianhang, et al. Ultrasonic evaluation and defect discrimination of T-shape R-zone in composite structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(5): 43–48.
- [13] 史俊伟, 刘松平, 刘菲菲, 等. RTM复合材料中分层缺陷的超声表征及量化分析[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(6): 68–73.
- SHI Junwei, LIU Songping, LIU Feifei, et al. Ultrasonic characterization and quantitative analysis for delamination in RTM composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(6): 68–73.
- [14] 罗忠兵, 曹欢庆, 林莉. 航空复材构件R区相控阵超声检测研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(14): 67–75.
- LUO Zhongbing, CAO Huanqing, LIN Li. Progress in study of phased array ultrasonic testing on CFRP radii in aerospace component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(14): 67–75.
- [15] 王喆, 杨辰龙, 周晓军, 等. 基于超声背散射信号递归定量分析的CFRP局部孔隙缺陷识别方法[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(21): 229–235.
- WANG Zhe, YANG Chenlong, ZHOU Xiaojun, et al. Identification method for CFRP local pore defects based on recursive quantitative analysis of ultrasonic backscattering signal[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(21): 229–235.
- [16] 李健, 郭薇, 杨晓霞, 等. 超声相控阵检测CFRP缺陷识别方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(8): 750–756.
- LI Jian, GUO Wei, YANG Xiaoxia, et al. A flaw classification method for ultrasonic phased array inspection of CFRP[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(8): 750–756.
- [17] MENG M, CHUA Y J, WOUTERSON E, et al. Ultrasonic signal classification and imaging system for composite materials via deep convolutional neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2017, 257: 128–135.
- [18] FENG W, ZHOU X J, ZENG X, et al. Ultrasonic inspection of localized defects in low-porosity CFRP[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(7): 1654.
- [19] ZHANG Z, GUO S F, LI Q, et al. Ultrasonic detection and characterization of delamination and rich resin in thick composites with waviness[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 189: 108016.
- [20] 苏慧敏, 罗忠兵, 曹欢庆, 等. 提高碳纤维增强树脂基复合材料弹性常数超声表征精度的方法[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(11): 2510–2516.
- SU Huimin, LUO Zhongbing, CAO Huanqing, et al. Improve methods for elastic constants ultrasonic characterization accuracy of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(11): 2510–2516.
- [21] 罗忠兵, 张松, 钱恒奎, 等. CFRP复杂几何结构区相控阵超声检测建模与声传播规律[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3672–3681.
- LUO Zhongbing, ZHANG Song, QIAN Hengkui, et al. Modelling and wave propagation behavior of phased array ultrasonic testing on carbon fiber reinforced plastics components with complex geometry[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3672–3681.
- [22] 万陶磊, 常俊杰, 曾雪峰, 等. 一种基于小波包和PCA的超声缺陷识别方法[J]. *失效分析与预防*, 2019, 14(3): 141–146.
- WAN Taolei, CHANG Junjie, ZENG Xuefeng, et al. An ultrasonic defect identification method based on wavelet packet and PCA[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2019, 14(3): 141–146.
- [23] DRON J P, BOLAERS F, RASOLOFONDRAIBE L. Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: Application to the detection of defects in ball bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 270(1–2): 61–73.
- [24] NIESŁONY A, BÖHM M, OWSIŃSKI R. Crest factor and kurtosis parameter under vibrational random loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 147: 106179.

通讯作者: 罗忠兵, 副教授, 博士, 研究方向为材料无损检测与评价。

(责编 阳光)