

碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展

杨红娟 杨正岩 杨雷 单一男 林奎旭 武湛君

Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites

YANG Hongjuan, YANG Zhengyan, YANG Lei, SHAN Yinan, LIN Kuixu, WU Zhanjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230318.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

强噪声下碳纤维增强树脂复合材料结构Lamb波层析损伤成像方法

Lamb wave tomography damage imaging of carbon fiber reinforced polymer composite structures in strong noise environment

复合材料学报. 2020, 37(4): 886–895 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190628.004>

基于相移光纤光栅传感器的碳纤维增强树脂复合材料基体裂纹超声探伤

Ultrasonic damage detection of matrix cracks in carbon fiber reinforced polymer composites using phase-shifted fiber Bragg grating sensor

复合材料学报. 2020, 37(1): 113–120 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190403.001>

基于空耦换能器的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料激光超声检测技术

Laser ultrasonic testing technology for carbon fiber reinforced resin braided composites based on air-coupled transducer

复合材料学报. 2021, 38(9): 2829–2838 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.003>

复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法

Probability-based diagnostic imaging for damage identification of stiffened composite panel

复合材料学报. 2018, 35(2): 311–319 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170505.001>

基于激光超声二次谐波技术检测纤维增强树脂复合材料加固混凝土结构剥离损伤

Detection on debonding damage of fiber reinforced polymer composite strengthened concrete structure based on laser ultrasonic second harmonic generation technology

复合材料学报. 2021, 38(1): 255–267 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200518.001>

不同厚度碳纤维布/环氧树脂复合材料孔隙率超声衰减模型

Ultrasonic attenuation model of porosity of carbon fiber cloth/epoxy resin composites with different thicknesses

复合材料学报. 2020, 37(4): 877–885 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190620.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展



分享本文

杨红娟¹, 杨正岩², 杨雷¹, 单一男³, 林奎旭¹, 武湛君^{*1}

(1. 大连理工大学 航空航天学院, 大连 116024; 2. 大连海事大学 交通运输工程学院, 大连 116026;

3. 大连交通大学 机车车辆工程学院, 大连 116028)

摘要: 碳纤维复合材料具有密度小、弹性高和韧性好等特点, 被广泛应用于航空航天和汽车工业等领域。由于碳纤维复合材料制作工艺的复杂性和不稳定性及服役期间易受环境的影响, 易产生分层、孔隙、纤维褶皱等各种类型的损伤。介绍了基于体波或导波的 C 扫描、相控阵、空气耦合、激光超声、光纤超声检测技术的原理、特点及用于碳纤维复合材料损伤检测的研究现状。综述了最具有代表性的损伤诊断成像算法, 包括全聚焦成像、三维可视化成像、层析成像、逆时偏移成像和概率成像方法, 这些成像方法能够有效地实现碳纤维复合材料各种类型的损伤形貌图像。从建立复杂构件的碳纤维复合材料层合板的阵列声场模型、优化损伤成像算法、构建智能/高效/实时化的结构健康监测成像系统、建立损伤定量评估标准、结合机器学习和数字孪生技术实施损伤诊断评估和寿命预测等方面进行了展望。

关键词: 超声检测; 超声成像; 损伤检测; 结构健康监测; 碳纤维复合材料

中图分类号: TB55; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2023)08-4295-23

Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites

YANG Hongjuan¹, YANG Zhengyan², YANG Lei¹, SHAN Yinan³, LIN Kuixu¹, WU Zhanjun^{*1}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Carbon fiber composites are widely used in aerospace and automotive industries due to the characteristics of low density, high elasticity, and better toughness. Due to the complexity and instability of the manufacturing process of carbon fiber composites and their vulnerability to environmental impact during service, it is likely to generate delamination, porosity, fiber wrinkle, and other types of damage. In this paper, the principles and characteristics of C-scan, phased array, air-coupled, optical fiber-ultrasound, and laser-ultrasonic testing based on body or guided waves, as well as the research status of these technologies for damage detection of carbon fiber composites, are introduced respectively. The most representative imaging algorithms for damage diagnosis are shown, including total-focus imaging, 3D visualization imaging, tomography, reverse time migration imaging, and probability imaging method, these imaging methods can effectively realize various types of damage morphology in carbon fiber composites. The prospect is made from the following aspects: The establishment of an array acoustic field model of carbon fiber composite laminates, the optimization of damage imaging method, the construction of intelligent/efficient/real-time structural health monitoring imaging system, the establishment of damage

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-03-08; 录用日期: 2023-03-11; 网络首发时间: 2023-03-20 15:22:37

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230318.001>

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702800; 2022YFB3402500); 国家自然科学基金 (12102075)

National Key Research and Development Program of China (2018YFA0702800; 2022YFB3402500); National Natural Science Foundation of China (12102075)

通信作者: 武湛君, 博士, 教授, 研究方向为复合材料与结构、结构健康监测、智能/纳米材料与结构 E-mail: wuzhj@dlut.edu.cn

引用格式: 杨红娟, 杨正岩, 杨雷, 等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4295-4317.

YANG Hongjuan, YANG Zhengyan, YANG Lei, et al. Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4295-4317(in Chinese).

quantitative evaluation criteria, and combination of machine learning and digital twin technology for damage diagnosis assessment and life prediction.

Keywords: ultrasonic testing; ultrasonic imaging; damage detection; structural health monitoring; carbon fiber composites

碳纤维复合材料具有高强度、高模量、良好的抗疲劳性能和抗腐蚀性能等，被广泛应用于航空、航天、汽车工业等领域^[1]。在航空领域，碳纤维复合材料有利于飞机结构的轻质化性能的提高，是民用飞机的主要组成材料之一^[2]。在航天领域，碳纤维复合材料的隔热、耐高温等特殊功能在飞行器、卫星、宇航器、固体火箭发动机和导弹壳体结构中，发挥着重要的作用。在汽车工业领域，随着低成本的制作工艺的发展，使具有减震效果和大规模整体成型等优点的先进碳纤维复合材料，在汽车工业领域呈现出蓬勃发展的势头^[3]。

然而，由于碳纤维复合材料在制作工艺过程中的不稳定性与服役时易受载荷和复杂环境的影响，不可避免地产生分层、孔隙、纤维断裂、纤维屈曲等损伤。这些损伤将严重地影响碳纤维复合材料层合板的力学性能。

超声无损检测技术因其检测设备便携、无污染危害及检测效率高等优点，是目前检测复合材料损伤最为实用、有效的技术手段之一。

然而，因碳纤维复合材料的各向异性和层状结构的影响，增加了超声检测技术检测复合材料层状结构中损伤的难度。利用超声检测技术围绕4个环节实现碳纤维复合材料中损伤的检测与成像：(1)建立碳纤维复合材料的声场模型，研究损伤处的声散射机制、声传播特性和声能量衰减规律；(2)设计先进换能器的参数和传感网络的布设方式；(3)采用高效率、高分辨率的超声成像算法；(4)构建碳纤维复合材料层合板中损伤的评估标准与智能化损伤识别体系。

本文将全面系统地介绍不同的超声检测技术的原理、特点和这些技术用于检测碳纤维复合材料损伤的发展现状。为能够更加精确和直观地呈现出损伤的形态，基于这些检测技术发展了超声成像算法，本文列举了其中最具有代表的成像算法，包括全聚焦成像、三维可视化成像、层析成像、逆时偏移成像、概率成像等成像算法。本文总结了这些成像算法应用于碳纤维复合材料损伤诊断的国内外研究现状，并对比分析了这些成像算法的特点及适用范围。从建立不同材料结构的

声场模型、优化损伤成像算法、构建智能/高效/实时化的检测和成像系统、建立损伤定量评估标准、结合机器学习和数字孪生技术实施损伤诊断评估和寿命预测等方面进行了展望。

1 碳纤维复合材料的声学模型

碳纤维复合材料层合板是由多个具有不同纤维取向的碳纤维层按照一定顺序堆叠固化形成的。碳纤维复合材料的损伤类型如图1所示。利用超声检测技术实现这些损伤的检测与成像的主要环节如图2所示。首先根据碳纤维复合材料结构的特性建立声学模型。目前的研究工作将超声在其中的传播模型分为两种，分别为基于体波在厚度方向或导波在面内方向检测的声学模型。

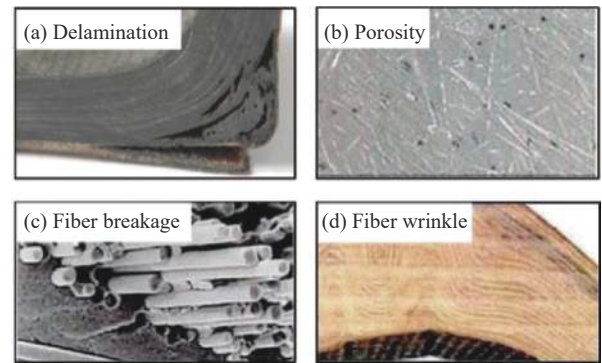


图1 碳纤维复合材料常见损伤^[4-5]

Fig. 1 Common damage in carbon fiber composite materials^[4-5]

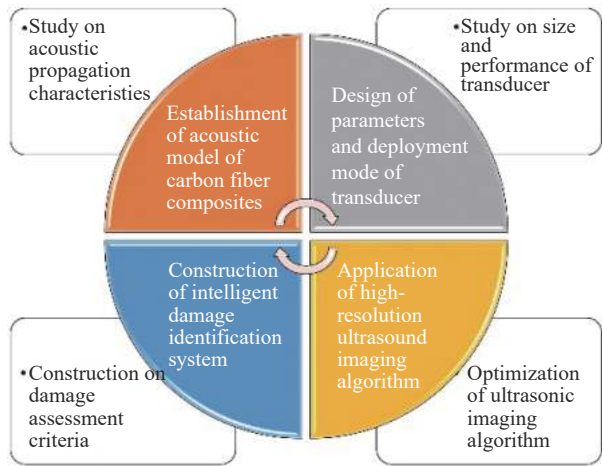


图2 损伤检测与成像的主要环节

Fig. 2 Main links of damage detection and imaging

1.1 基于体波在厚度方向检测的声学模型

1.1.1 各向同性模型

在工业检测领域，通常将碳纤维复合材料在厚度方向上简化为各向同性介质，如图 3 所示的 xz 平面，采用单探头以垂直入射的方式测量的声速为碳纤维复合材料的恒定声速。

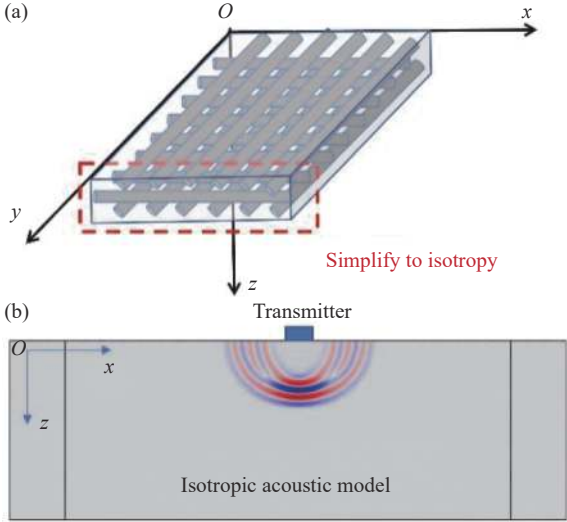


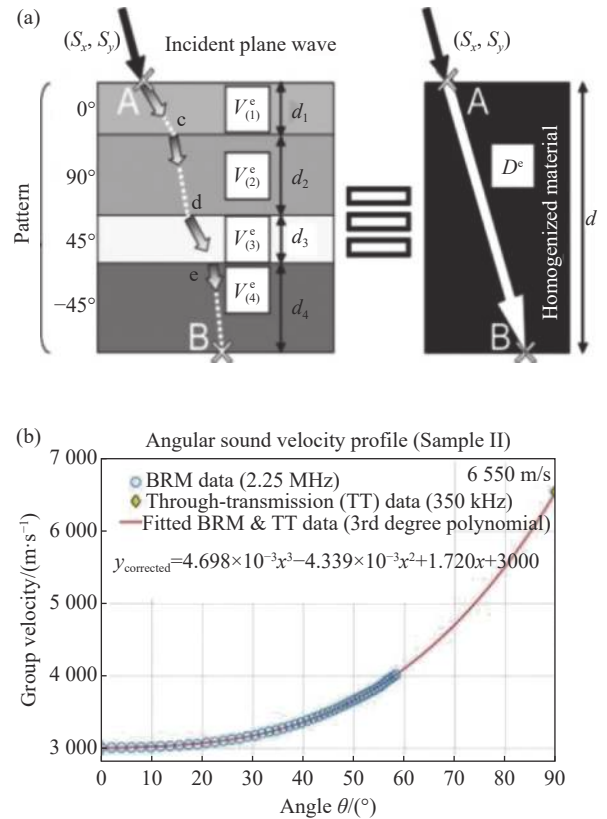
图 3 基于体波检测的碳纤维复合材料各向同性声学模型
Fig. 3 Isotropic acoustic model for carbon fiber composites based on body wave detection

然而，若采用超声阵列检测技术，对于不同铺层方向堆叠的多向碳纤维复合材料层合板的检测，不可避免地出现斜入射的声传播路径。若基于各向同性声学模型进行检测，易造成损伤的误检和漏检。

1.1.2 均质化模型

在常用的超声波频率 (1~10 MHz) 下的波长 (0.3~3 mm) 大于碳纤维复合材料的每层厚度 (0.125~0.25 mm)。因此，如图 4(a) 所示，声波由 A 点 (坐标 S_x, S_y) 入射经过不同层厚 (d_1, d_2, d_3, d_4) 和不同的铺层方向的碳纤维复合材料到达 B 点，可通过合成 AB 点的射线追踪模型推导出的等效慢度面来获得等效刚度常数，建立均质化声学模型^[6-7]。通过底面反射法 (Backwall reflection method, BRM) 和穿透 (Through-transmission, TT) 法，可获取此模型在厚度方向上的速度分布曲线如图 4(b) 所示。

虽然基于射线理论的均质化声学模型将碳纤维复合材料多向板所包含的整体均质化，从而简化了计算过程。然而，该模型忽略了声波在碳纤维复合材料多层结构中的反射和折射现象，从而降低了识别和定位损伤的精度。



(S_x, S_y)—Coordinates of point A; A—Incidence point; c, d, e—Refraction point of each layer; B—End point; d_1, d_2, d_3, d_4 —Thickness of each layer; V^e —Velocity of each layer; BRM—Backwall reflection method; D^e —Average energy ray direction; d —Plate thickness

图 4 均质化声学模型示意图 (a)^[6] 和速度分布曲线 (b)^[7]

Fig. 4 Schematic diagram of the homogenization acoustic model (a)^[6] and velocity distribution curve (b)^[7]

1.1.3 各向异性非均质化模型

在考虑碳纤维复合材料的各向异性和多层结构的影响下，建立非均质化的各向异性声学模型。对于单向铺层的碳纤维复合材料，超声波在其中的传播符合各向异性弹性波的传播规律。可根据弹性波动方程推导出 Christoffel 方程，Christoffel 方程用于表征相速度和群速度的分布。该方程表明了声速空间分布与材料弹性刚度系数矩阵直接相关，Christoffel 方程^[8]如下：

$$(\Gamma_{ij} - \rho c^2 \delta_{ij}) u_i = 0 \tag{1}$$

其中： ρ 是介质密度； c 是相速度； δ_{ij} 是 Kronecker delta 符号； $\Gamma_{ij} = C_{ijlm} n_l n_j$ 是 Christoffel 矩阵； u_i 是质点位移； C_{ijlm} 是 4 阶弹性刚度张量 ($i, j, l, m=1, 2, 3$)； n_1, n_2 和 n_3 是声传播单位矢量的分量。

通过求解 Christoffel 方程，可以得到关于相速度的 3 个解，分别对应准纵波 (qP 波)、准垂直剪切波 (qSV 波) 及准水平剪切波 (qSH 波) 3 种波型。与各向同性介质不同的是，各向异性介质中

的相速度与群速度在传播方向和大小均不相同。
图 5(a) 为碳纤维铺层角度分别为 0°、±45°、90° 方向的准纵波 (qP 波) 群速度空间分布。

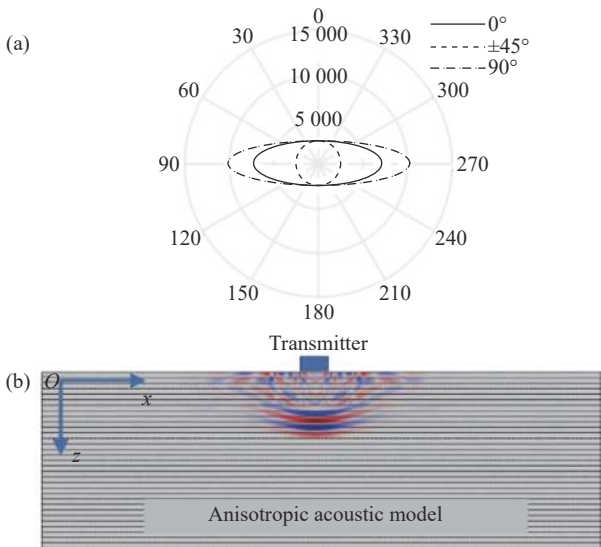


图 5 基于体波的碳纤维复合材料各向异性声学模型
Fig. 5 Anisotropic acoustic model for carbon fiber composites based on body wave

图 5(b) 为基于各向异性声学模型的声传播示意图。可以明显看出，由于准纵波在不同方向铺层中传播时，垂直传播的声速相一致。因此，在垂直传播的方向没有层间反射和折射，反之在偏离垂直方向的波产生了多次反射和折射的结构噪声。

1.2 基于导波在面内方向检测的声学模型

1.2.1 准各向同性模型

超声导波是由超声波在边界区域发生多次反

射、折射并相互叠加而形成的。超声导波不仅与材料参数相关，还与边界条件有关，这导致超声导波比传统超声体波更加复杂，具有多模态和频散特性，例如板中传播的 Lamb 波。Lamb 波有对称模态和反对称模态。

理论上，因复合材料层合板的各向异性，Lamb 波在复合材料中的传播特性与方向有关。然而，如果选用足够多的不同碳纤维方向的铺层获得的层合板可以被视为准各向同性模型^[9-10]。例如，碳纤维复合材料的叠层顺序为 [0/90/-45/45]₂ 可视为准各向同性复合材料板^[11]。

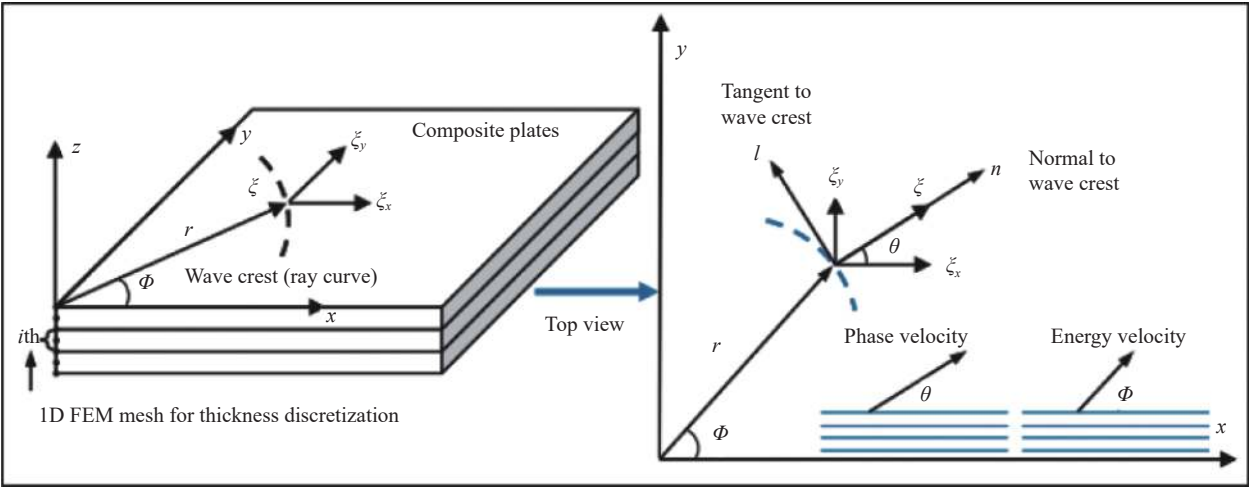
1.2.2 各向异性非均质化模型

考虑碳纤维复合材料的各向异性，波在碳纤维复合材料层合板中的传播出现了复杂的现象，如相速度和群速度方向不一致。在 *N* 层复合材料层合板中，各层内的波满足 Navier 位移方程^[12]：

$$\mu^n \nabla^2 \mathbf{u}^n + (\lambda^n + \mu^n) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}^n) = \rho^n \frac{\partial^2 \mathbf{u}^n}{\partial t^2}$$
 (2)

式中：*n* = 1, 2, 3..., *N*; ρ^n 、 λ^n 、 μ^n 是第 *n* 层的密度和拉梅常数；**u**、*t* 分别为位移和时间变量。基于导波的碳纤维复合材料各向异性声学模型如图 6 所示 (图中 FEM 为有限单元法；*i* 代表层序号；*r* 是波传播矢量； Φ 是波传播的方向与 *x* 轴的夹角； ξ 是波数； θ 是波数与 *x* 轴的夹角)，碳纤维复合材料的上下边界为自由边界条件，各层为刚性连接，可获得频散方程为^[12]

$$|A(\omega, k, \lambda^n, \mu^n, h_n)| = 0$$
 (3)



FEM—Finite element method; *i*—Layer number; *r*—Wave vector; Φ —The angle between the direction of wave propagation and the *x*-axis; ξ —Wave number; θ —The angle between the wave number and the *x*-axis; *l*—Direction tangent to wave crest; *n*—Direction normal to wave crest

图 6 基于导波的碳纤维复合材料各向异性声学模型^[13]

Fig. 6 Anisotropic acoustic model for carbon fiber composites based on guided wave^[13]

其中： A 、 ω 、 k 、 h_n 是系数矩阵、频率、波数、几何参数。

通常采用有限元法^[14]、半解析有限元法^[15]、传递矩阵法^[16]、全局矩阵法^[17]和谱元法^[18]等求解复合材料中导波传播特性。虽然有限元方法易于实现，且能够适用于多个铺层方向的碳纤维复合材料层合板，但是其计算时间太长。目前常采用传递矩阵法和全局矩阵法，传递矩阵法使用起来较方便，但是在大频厚积易于出现数值不稳定现象，可采用全局矩阵法以消除不稳定的现象，张海燕等^[17]将全局矩阵法应用于碳纤维复合材料层合板中的超声导波的传播特性分析中。此外，Li等^[18]采用谱元法研究了3种不同铺层形式的碳纤维复合材料层合板的导波传播问题，研究结果表明反对称模态更适合用于识别碳纤维复合材料结构中的分层损伤。除此之外，He等^[19]采用数学近似的Legendre正交多项式方法推导和求解了各向异性复合材料层合板的导波方程。

研究人员针对复合材料中的导波衰减问题开展了一系列研究，包括衰减模型研究和导波衰减问题研究等。衰减模型有Hyteretic模型^[20]、Rayleigh模型^[21]和Kelvin-Voigt模型^[22]。Gresil等^[23]采用Rayleigh衰减模型探究了碳纤维复合材料层合板中的导波衰减问题。对于Kelvin-Voigt衰减模型，Shen等^[22]和Mei等^[13]开展了复合材料板中理论和实验研究，实验验证了该衰减模型的准确性。

2 面向碳纤维复合材料的超声检测技术

超声无损检测技术分类的方法有很多，按照波型可以分为纵波、横波、表面波、导波检测技术等；按照扫描显示方式可以分为A扫、B扫和C扫等。

现用于碳纤维复合材料层合板的超声检测技术，常用的有C扫描检测技术、相控阵检测技术、激光超声检测技术、空气耦合检测技术和光纤超声检测技术。下面介绍这几项检测技术分别基于体波与导波检测的原理与特点及用于碳纤维复合材料中损伤诊断的研究现状。

2.1 体波检测技术

常规的超声体波检测方法利用超声体波遇到损伤、边界等异质界面会发生反射、折射现象，从而检测出损伤。检测方式有脉冲反射法和脉冲穿透法。

2.1.1 基于体波的C扫描检测技术

目前基于超声体波检测技术有B扫描和C扫描检测技术，如图7所示。

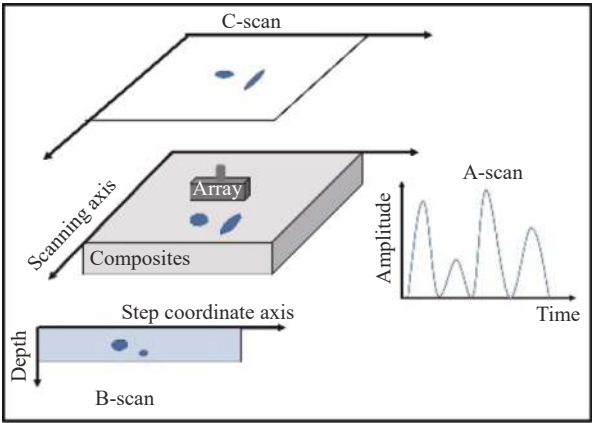


图7 B扫描和C扫描检测技术
Fig. 7 B-scan and C-scan detection technology

C扫描检测技术能够实现碳纤维复合材料大面积的损伤成像。图8为GE公司用于大型复合材料结构损伤检测的超声波水浸C扫描探伤系统^[24]，该技术具有显示直观和检测速度快的特点。



图8 超声C扫描检测系统^[24]
Fig. 8 Ultrasonic C-scan detection system^[24]

影响C扫描成像显示的可靠性因素可能为检测步进、检测频率和检测增益，汪林娜等^[25]通过实验验证了这些因素的影响，结果表明检测较薄的碳纤维复合材料损伤，需要减小检测步进，采用高频探头，选择合适的增益以提高检测结果的可靠性。

2.1.2 基于体波的相控阵检测技术

超声相控阵检测技术通过控制换能器阵列各阵元按照一定的延迟时间和幅值，激发(或接收)脉冲信号，实现声束的偏转和聚焦^[26]。

相控阵换能器的尺寸、阵列的间距、数量、换能器的排列方式、发射源孔径的大小等都影响着损伤检测的准确度。在无损检测领域中，常采

用线性排列的换能器阵列实现碳纤维复合材料在厚度方向的损伤检测和定位，其换能器的宽度和阵列的间距参数的设计影响着纵横波的辐射指向性。常用于碳纤维复合材料损伤检测的线性换能器阵列的参数列于表 1 中。

表 1 检测碳纤维复合材料的线性换能器阵列参数
Table 1 Linear transducer array parameters for carbon fiber composites

Element pitch/mm	Number of element	Centre frequency/MHz	Ref.
0.6	64	5	[7]
0.75	64	2.25	[7]
1.4	32	2.25	[27]
1	64	5	[28]
0.63	64	5	[29]
0.6	16	7	[30]
1.0	32	5	[31]
0.3	128	10	[32]
0.6	32	5	[33-34]

因超声相控阵检测技术具有高检测分辨率、高检测准确度、高灵敏度等优势，非常适用于高衰减和复杂形状的碳纤维复合材料的分层、夹杂、裂纹、钻孔、纤维屈曲等各种损伤类型进行检测。例如对于碳纤维复合材料中的分层损伤，Nageswaran 等^[30]对分层损伤进行检测和分类，并评估其对在役部件完整性的威胁；进一步地，为验证相控阵技术的检测能力，Meola 等^[35]将此技术与红外热成像技术进行对比，同时采用这两项技术对预埋分层损伤进行了检测，证明了相控阵技术能够有效地检测出较厚的碳纤维复合材料层合板中的预埋分层损伤的大小、尺寸和深度等信息。Caminero 等^[36]在不同深度的碳纤维复合材料层压板中嵌入不同尺寸和形状的人工损伤，研究了铺层的堆叠顺序对损伤区域的影响。以上这些对于分层损伤的检测，基于预埋损伤与复合材料声阻抗差异较大，而诊断出分层损伤，但均没有进行一个分层损伤的量化评估。曹弘毅等^[37]利用超声-6 dB 法定量分析了 C 扫图像中的损伤，结果表明了超声相控阵对小损伤具有较好的检测效果。

由于碳纤维复合材料的各向异性造成无法使用常规的时差法计算相控阵的延迟时间从而影响损伤的 B 扫描图像，徐娜等^[33]提出声速校正方法，并对比分析校正前后的 B 扫图像，证明了经过声速校正后有效提高了近表面区域的损伤检出率。

因此，利用超声相控阵检测技术能够检测出碳纤维复合材料厚度方向的微小损伤和近表面区

域的损伤，具有较高的空间分辨率。

2.1.3 基于体波的空气耦合超声检测技术

上述的 B 扫描、C 扫描和相控阵检测技术，都需要借助水耦合、甘油耦合或者粘贴于结构表面耦合，才能实现碳纤维复合材料层合板中的超声检测。然而，在航空航天方面对产品的安全性能有着极高的要求，液体耦合剂会渗透进复合材料而破坏其力学性能和尺寸的稳定性。因此，需要采用非接触的检测技术，例如空气耦合检测技术和激光超声检测技术。

采用基于体波的空气耦合检测技术用于碳纤维复合材料中的损伤检测的难点在于：(1) 超声波在空气中衰减快；(2) 在空气与碳纤维复合材料的界面处会产生强烈反射，导致进入复合材料中的能量低；(3) 由于碳纤维复合材料为高衰减材料，导致接收的超声波含有较高的结构噪声且损伤信号微弱。

国内在空气耦合检测换能器设计方面的发展，已取得了进步。周正干等^[38]、魏东等^[39]针对空气耦合超声检测中的信号微弱、信噪比低等问题，研究了调频脉冲压缩方法。此外，危荃等^[40]基于空气耦合超声检测技术基本原理，建立了空气耦合超声检测系统。为实现碳纤维复合材料的损伤检测，殷晓康等^[41]和高双胜等^[42]通过自研制的空气耦合超声检测系统，分别实现了碳纤维复合材料中的平底孔和冲击损伤的 C 扫描显示。另外，对于碳纤维复合材料的脱粘损伤，董方旭等^[43]采用空气耦合超声检测系统，基于穿透法实现了脱粘损伤的 C 扫描成像显示。

国外对于空气耦合检测的研究起步早于国内，其检测设备较成熟。Imielińska 等^[44]采用空气耦合超声换能器结合 C 扫描技术检测碳纤维复合材料的冲击损伤(图 9(a))，并进行冲击响应后的损伤尺寸评估，检测结果与射线检测结果(图 9(b))进行对比，呈现出较好的一致性。

虽然，基于体波的空气耦合超声技术能够很好地实现碳纤维复合材料中的脱粘损伤和冲击损伤的检测，但是空气耦合超声因其信号衰减很大，难以实现较厚的碳纤维复合材料层合板中微小损伤的检测。

2.1.4 基于体波的激光超声检测技术

激光超声检测技术是非接触式的超声检测技术，其检测原理是利用激光脉冲照射到材料表面，

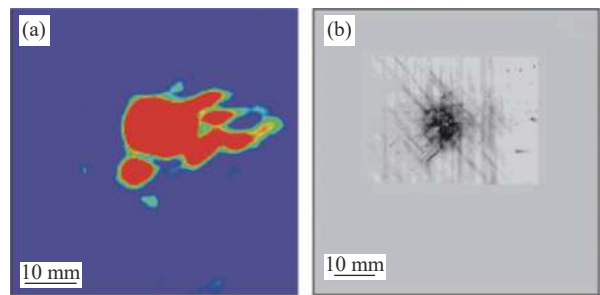


图 9 检测复合材料中的冲击损伤: (a) 超声波 C 扫描技术; (b) X 射线技术^[44]

Fig. 9 Detection of impact damage in composites: (a) Ultrasonic C-scan technology; (b) X-ray technology^[44]

发生热弹性效应，形成热应力，从而激励出纵波、横波和导波等超声波，沿着结构表面或者内部传播，利用激光接收超声波，达到材料和结构无损检测的目的。激光超声检测技术具有远距离、非接触、高分辨力、大范围检测、激发超声频带宽等优点，同时树脂基复合材料对激光的吸收系数较大，可以满足超声转换效率的要求，因此激光超声检测技术在碳纤维复合材料层状结构检测领域有很大发展潜力。但是，激光超声在复合材料检测领域有几个问题^[24]：能量转换效率较低、激光超声信号微弱、增大激光能量可能导致材料烧蚀问题。

在国内，Sun 等^[45]采用激光激励与激光接收的检测方式，基于自研的激光超声检测系统，实现了复合材料的分层损伤检测。郭佳等^[46]同样基于激光激励与激光接收的检测方式，分别采用了脉冲反射法和穿透法，对碳纤维复合材料中不同大小的圆形损伤进行检测，如图 10 所示，结果表明激光超声检测技术能够检测出直径 φ 为 2 mm 的圆形损伤。刘松平等^[47]采用激光激励纵波与超声换能器接收信号的检测方式，研究了复合材料中常见损伤的激光超声信号特征与损伤识别评估方法。随着几十年的发展，国内激光超声技术在激励、接收、理论和技术等方面取得了极大进步。

在国外，洛克希德·马丁航空公司独立开发了自己的激光超声检测系统，名为 LaserUT。该系统能够实现厚度为 44 mm 的碳纤维复合材料损伤的检测，该系统被证实能够实现先进的军用飞机的复合材料的损伤检测^[48]。对于大曲率的复杂型面结构的碳纤维复合材料工件，Vandenrijt 等^[49]结合机械手臂，采用激光超声技术实现了其中的损伤检测。此外，Zeng 等^[50]结合激光和空气耦合

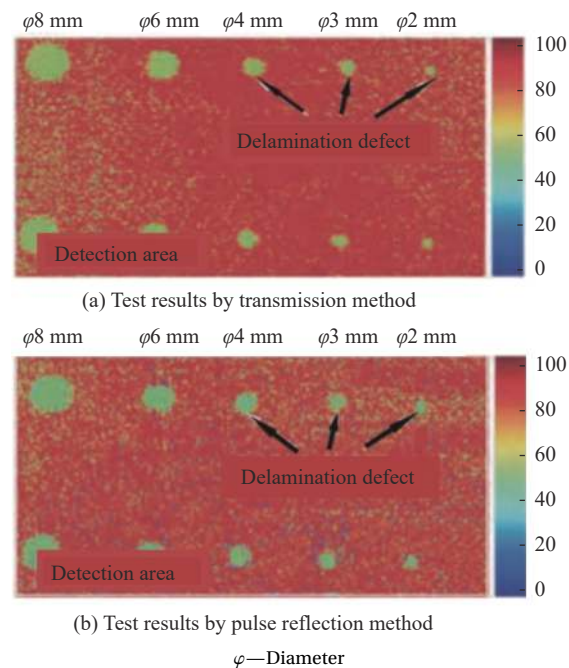


图 10 激光超声检测复合材料的结果^[46]

Fig. 10 Results of the composite by the laser ultrasound^[46]

技术，开发出用于检测编织碳纤维复合材料的空气耦合激光超声检测系统，并分析了表面编织结构对激光超声信号的影响，实现了碳纤维复合材料的浅层和深层的损伤检测，并对比于相控阵检测技术，具有更高的对比度和更少的检测率。

以上的检测技术将碳纤维复合材料视为各向同性声学模型下对损伤进行成像，然而在明确各向异性声学模型下的声速空间分布之后，采用上述的 B 扫、C 扫检测技术、相控阵检测技术、激光超声检测技术和空气耦合检测技术，能够实现碳纤维复合材料中损伤更准确的检测。例如，Lin 等^[51]考虑到碳纤维复合材料的各向异性与非均匀性，给出了 3 种波 (qP 波、qSV 波和 qSH 波) 的群速度的空间分布曲线，并成功地检测出分层损伤。对于纤维褶皱这类与复合材料声阻抗差异较小的损伤，周正干等^[32]利用准纵波有效检测出碳纤维复合材料层压板中的纤维褶皱。

因此，基于体波结合 C 扫描、相控阵、空气耦合、激光超声等检测技术，能够较好地实现碳纤维复合材料层合板中的微小损伤，但其检测效率有待提高。

2.2 导波检测技术

相比于基于体波的检测技术检测范围小，超声导波具有检测范围广、检测效率高特点，被广泛用于航空航天领域大型碳纤维复合材料薄板

的损伤检测。在明确了导波的传播特性后,可结合超声 C 扫描、相控阵、激光超声、空气耦合检测技术,激发出导波用于检测碳纤维复合材料薄板中的损伤,从而实现大范围的结构健康监测。

在 20 世纪 90 年代中期,Guo 等^[52]首次将超声 Lamb 波应用到复合材料层板中分层损伤的检测。

2.2.1 基于导波的相控阵检测技术

基于超声导波的相控阵检测技术适合应用于薄壁结构的损伤检测,具有大面积扫查、信噪比高、声束方向灵活可控、检测灵敏度高等优点。

基于导波的相控阵检测技术在金属板类结构上进行了深入研究,包括波束形成算法研究^[53-54]、波束优化研究^[55]、阵列分布方式的设计(一维^[53]和二维^[56-57])等。

近年来,研究人员逐步将相控阵检测技术用于复合材料中的损伤检测,由于复合材料的各向异性,难于实现波束形成。Yan 等^[58-59]研究了复合材料板中线性阵列的波束转向问题,选取准各向同性导波模态进行波束导向,以抑制各向异性的影响。利用弱各向异性导波模态,并假设相速度和群速度方向局部重合,基于单发多收阵列的数据定位复合材料板中的钻孔损伤。Vishnuvardhan 等^[60]使用单发多收阵列检测准各向同性复合材料板中撞击分层损伤。Leleux 等^[61]使用超声相控阵探头激励中心频率为 0.5 MHz 的 S0 模态,实现对复合材料板中的损伤进行检测,但是该方法局限于相同方向的相速度和群速度。Purekar 等^[62]研究了一维线性相控阵检测复合材料层合板分层损伤的能力,结果表明,该阵列在相速度和群速度方向相同的方向上可以检测到损伤。Yu 等^[63]提出了一种考虑导波参数和能量偏斜效应的相控阵算法,在各向异性复合材料板上形成相控阵波束,实现多损伤的成像检测。此外,Huan 等^[64]研究了铝板中基于 SH0 模态相控阵检测技术,SH0 模态无频散,但是还未有学者利用该模态到复合材料的导波相控阵检测中。

对于复合材料薄壁结构,基于超声导波的相控阵检测技术更加适合,该技术目前还未走向工程应用,需要研究人员在针对各向异性复合材料检测的超声导波相控阵列设计、信号处理与成像诊断、自动化检测系统等方面继续开展研究。

2.2.2 基于导波的空气耦合检测技术

采用基于导波的空气耦合检测技术,实现碳

纤维复合材料的损伤检测是近几年的研究热点。结合导波检测范围广和空气耦合非接触检测的特点,非常适合用于大尺寸的碳纤维复合材料的损伤检测。

超声导波的模态调谐潜力对复合材料分层等不同类型的损伤具有极好的灵敏度。如果选择合适的入射角,可以使用空气耦合换能器很好地生成和检测 Lamb 波^[65]。Yan 等^[66]通过调节入射波的角度控制 Lamb 波的模态,通过设置阈值级别来确定损伤的大小,并通过分析颜色映射大小来确定碳纤维复合材料中损伤的严重程度。进一步,Liu 等^[67-68]研究发现通过空气耦合换能器能够定向接收分层损伤的反射波,从而通过反射波确定碳纤维复合材料梁的分层损伤两端的大小和位置。吴霞等^[69]采用空气耦合超声换能器置于碳纤维复合材料层压板的同侧,激励和接收 A0 模态的 Lamb 波,提出时频域的损伤指数算法,实现了损伤的定位定量评估。

国内外对于空气耦合超声检测技术应用于碳纤维复合材料的检测方面,在算法和仿真方面都做了一些研究,但是,目前国内的研究还依赖于国外的设备。因此,为实现空气耦合超声检测在航天航空领域的工业化的应用,还需根据碳纤维复合材料的特性,研发出一体化、自动化和智能化的空气耦合超声检测设备。

2.2.3 基于导波的激光超声检测技术

激光超声导波检测技术具有非接触、可远距离、高效、可适用于复杂构件检测等特点,被广泛用于大曲率的涡轮叶片、机翼、钻头复杂结构的检测中。Zhang 等^[70]基于激光超声扫描技术,提出了一种基于异常入射波能量的改进成像方法,并根据能量分布图以显示碳纤维复合材料中损伤的大小和形状。

虽然激光超声检测技术在复合材料损伤检测方面具有优势,但是其应用成本远高于其他的检测技术。因此,还需研发出低成本和小型化的激光超声检测设备。

基于超声导波的检测技术由于具有传播距离远、响应快、可以探测传统超声波检测技术难以检测的部位等优点,十分适合定性检测复合材料大面积薄壁结构的脱粘、裂纹和腐蚀等损伤。然而,导波的检测分辨率有限。

另外,在实用状态下,复合材料结构可能会面

临温度变化、振动等外部因素的影响，Salamone 等^[71]、Gao 等^[72]、Wang 等^[73]、Sun 等^[74]开展了变温度环境下的复合材料层合板的损伤检测，包括温度对导波频散曲线的变化影响^[75]、温度对换能器胶层传导应变能力的影响^[76]、温度补偿^[77]等。

2.2.4 基于导波的光纤超声检测技术

相较于传统的超声波压电陶瓷换能器易受电磁环境的干扰和不耐腐蚀的缺点，光纤超声波换能器具有不易受电磁干扰、耐腐蚀、能够埋入被测物体、换能器尺寸小等特点，成功应用于工业无损检测^[78]、海洋地震勘探^[79]等领域。

光纤超声检测技术的研究始于 1990 年 Alcoz 等^[80]研发出的一种新型光纤超声换能器用于复合材料损伤检测，至今国内外对这方面的研究已开展了 30 余年，从而使光纤超声检测装置在检测频率范围^[81]和检测灵敏度^[82]方面都得到了提升。光纤超声检测技术作为一种无损检测新型检测技术，

被广泛应用于金属裂纹^[83-85]和复合材料^[86-87]的损伤检测。

光纤超声检测技术的基本原理是利用超声波与光纤之间的相互作用引起的光纤传输的光的强度、相位、波长、偏振状态等的改变，从而获取被测物体内部的信息。光纤超声检测系统示意如图 11 所示，为一种典型的光纤超声检测系统，在该系统中由压电陶瓷超声换能器激发出导波，利用光纤光栅 (Fiber bragg grating, FBG) 接收导波信号。研究表明，对比于激发出的对称模态波和反对称模态波，光纤换能器对于对称模态波更敏感^[89]。因此，Tsuda^[88]利用激发出的对称模态波检测正交碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fibre reinforced plastics, CFRP) 中的冲击损伤，通过比较压电陶瓷和光纤换能器的接收信号响应，表明光纤换能器对信号响应的灵敏度更高，比传统的压电换能器更适合于超声导波的检测。

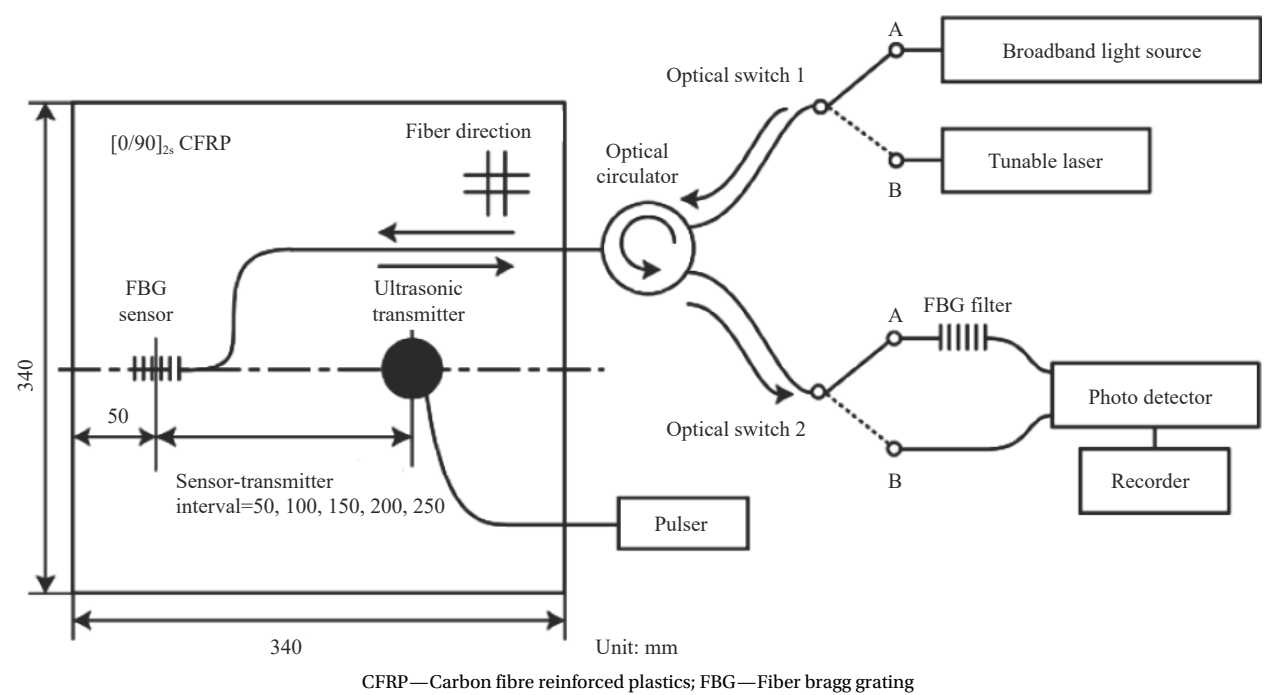


图 11 光纤超声检测系统示意图^[88]

Fig. 11 Schematic diagram of optical fiber ultrasonic testing system^[88]

综上所述，利用光纤超声检测技术可实现碳纤维复合材料冲击损伤的检测，然而该技术在工程应用方面，还需在系统结构、换能器的性能和反馈控制器等方面进行优化。

2.3 各种检测技术的比较

将以上介绍的这些常用的超声检测技术的特点列于表 2，这些技术能够实现相互结合检测。

例如 Spytek 等^[90]则是结合了体波和导波的优点，提出两部损伤评估框架。首先，利用导波对于复杂构件的碳纤维复合材料板进行快速大面积的扫查，再针对出现损伤的区域采用高频的超声激光超声检测技术，实现高分辨率的损伤成像。因此，需要根据实际检测要求和环境，选择相应的超声检测技术。

表 2 用于碳纤维复合材料损伤的检测技术的比较

Table 2 Comparison of damage detection techniques for carbon fiber composites

Detection technique	Wave type	Damage type	Feature
C-scan	Body wave	Hole ^[25] , delamination ^[37] , impact damage ^[42] , debonding defect ^[43]	Intuitive display and high detection efficiency
Phased array	Body wave	Delamination ^[30, 35, 51] , fiber wrinkle defect ^[32]	Acoustic beam focusing, high detection accuracy, high detection sensitivity
	Guided wave	Delamination ^[90] , drill hole ^[59] , multiple surface damage ^[63]	
Air-coupled	Body wave	Delamination ^[40] , square hole ^[41] , impact damage ^[42] , debonding defect ^[43]	Contactless, no coupling agent, no effect on material properties
	Guided wave	Circular defect ^[69]	
Laser ultrasonic	Body wave	Circular defect ^[46] , delamination ^[45]	Long-distance, contactless, high-resolution, wide-range detection
	Guided wave	Impact damage ^[70]	
Optical fiber ultrasonic	Guided wave	Impact damage ^[88]	Anti-electromagnetic interference, corrosion resistant

基于体波的检测技术能够实现厚度方向上微小损伤的检测，现有研究检测碳纤维复合材料的样品厚度的范围约为 3~6.4 mm，在检测频率为 20 MHz 时，能够检测到的最小损伤直径约为 0.5 mm^[25]。基于导波的检测技术，检测的样品厚度范围一般为 2.54~4 mm 的碳纤维复合材料层合板，该技术具有检测范围广和检测效率高等优势，能够检测最小损伤直径约为 3 mm^[69]。

3 面向碳纤维复合材料的损伤成像方法

利用超声成像算法对损伤进行诊断，能够更加直观地表征损伤的严重程度。然而，由于超声波信号在碳纤维复合材料中呈现出高衰减的现象，造成接收回波幅值信号小、不易提取损伤特征信息。对接收的信号在成像之前进行预处理，就显得十分重要^[91]。根据超声信号是一种典型的非线性和非平稳的信号特征，常采用时频域的分析方法提取损伤信号的特征。超声回波的时频分析主要用于去掉测量噪声的干扰、区分重叠的回波和识别出信号特性的变化三大方面^[92]。常用的时频分析方法有小波变换、短时傅里叶变换、S 变换、希尔伯特-黄变换等方法^[93]。其中小波变换被广泛应用于无损检测领域中，利用小波变换对超声回波信号进行降噪^[94]，结合模极大值进行了信号奇异点的检测，从而提高了损伤回波信号的检出能力。进一步，为解决复合材料中临近表面的分层损伤的检测问题，利用 S 变换^[95]和希尔伯特-黄变换^[96]提高检测损伤的分辨率。

3.1 全聚焦成像

全聚焦方法^[97]通过处理采集的全矩阵数据，对于待检测空间中的每一点，进行虚拟聚焦成像显示。具体实现步骤如下：将待测试块所处的二

维空间划分为离散的坐标点，将每一个坐标点视为虚拟聚焦的焦点，对于发射阵元 $i(a_i, 0)$ 和接收阵元 $j(a_j, 0)$ 的组合，从接收阵元 $j(a_j, 0)$ 接收的信号中，确定空间的某点 $X(x, z)$ 所历经的同等时间的回波幅值，就是该点 X 的成像幅值。

因此，在全聚焦成像方法中，对于二维空间的成像幅值，可表示为

$$I(X) = \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} \left(\frac{\sqrt{(a_i - x)^2 + z^2} + \sqrt{(a_j - x)^2 + z^2}}{c} \right) \right| \quad (4)$$

其中： S_{ij} 表示为对于第 i 个阵元作为发射阵元，第 j 个阵元作为接收阵元接收的信号； c 为待测试块中的声速。

由全聚焦成像方法的原理可知，精确地计算声时是影响成像效果的主要因素。而目前针对碳纤维复合材料的声时计算，基于的模型分为三类：第一类是将复合材料视为各向同性介质；第二类则是将复合材料均质化处理；第三类则是考虑了复合材料的非均匀性和各向异性，采用一些声线示踪的方法进行声时的计算。

为了实现褶皱损伤的精确表征，张海燕等^[31]基于上述第一类各向同性声学模型，结合超声波在传播时声场能量与声束扩散方向的关系，对全聚焦成像方法进行了校正，校正后的褶皱损伤成像图和实物图较一致。

由于超声检测波长大于复合材料层状厚度，符合均质化理论^[6, 98-99]。据此，Yan 等^[27]和 Li 等^[29]对于复合材料中的 3 个不同深度的横通孔进行了全聚焦成像，结果表明成像效果优于各向同性的

模型，但是因铺层反射的结构噪声的影响，使成像信噪比较低。

为精确实现损伤的诊断成像，还需对复合材料中的声传播路径和声时进行分析与计算。目前用于层状结构的复合材料的声时计算有正演与反演两大类的声线示踪方法。正演类声线示踪方法通过分析入射声波经过异种各向异性材料的分界面的反射和折射现象^[100]，建立声线传播路径。

反演类声线示踪方法则是基于费马原理在已知声波发射源的位置和目标点的位置的条件下，反演出它们之间的声传播路径和声时。这与计算机领域中搜索最短路径算法的目的相一致，因此，不少学者将 Dijkstra 算法、A*算法^[100]和 Viterbi 算法^[32]用于奥氏体刚焊缝和碳纤维复合材料等各向异性材料的检测中。

Dijkstra 算法^[101]是从一个顶点到其余各顶点的最短路径算法，解决的是有权图中最短路径问题。而 A*算法^[102]在 Dijkstra 算法的基础上增加一个启发式函数来进行射线追踪，提高了搜索效率。这些算法采用了求解路径规划问题的策略，适合于沿给定节点寻找路径。Zhou 等^[103]结合 Dijkstra 算法和 Snell 定律，提出用于阵列成像的高效超声射线追踪算法。Lin 等^[51]提出了一种基于 Dijkstra 算法的射线追踪方法，对不同耦合条件下的碳纤维复合材料中的横通孔，实现了这些损伤的更清晰的全聚焦图像。横通孔、分层、夹杂等损伤与复合材料的声阻抗差异较大的损伤易于检出。而对于纤维褶皱这类与复合材料声阻抗差异较小的损伤，若使用常规超声方法则会出现漏检和误检等现象。利用超声相控阵与全聚焦方法的结合，如图 12 所示，有效检测出多向碳纤维复合材料层压板中的纤维褶皱损伤^[32]。除此之外，Dijkstra 算法也被应用于复合材料角部件结构^[34]和混凝土^[104-106]中的损伤诊断。

综上所述，全聚焦成像应用于平板类碳纤维复合材料的研究较多，对于复杂结构的碳纤维复合材料中损伤的成像研究较少。另外，目前的全

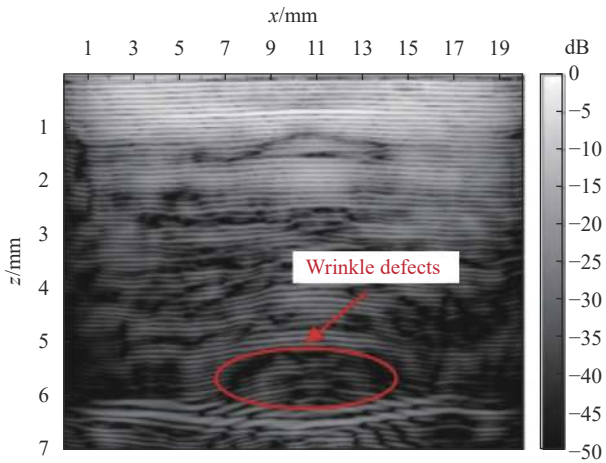


图 12 碳纤维复合材料中褶皱损伤的 TFM 成像^[32]

Fig. 12 TFM imaging of wrinkle defects in carbon fiber composites^[32]

聚焦成像技术，没有考虑声衰减的变化，若考虑了能量的变化，再优选声传播路径或者对衰减的能量进行补偿，能够进一步提高全聚焦成像的效果。

3.2 三维可视化成像

现有的超声图像可视化表征基本是二维图像，例如 B 扫、C 扫描显示和全聚焦成像结果。为更加立体地呈现出复合材料中损伤的大小、位置和形状等方面的信息，可采用三维可视化成像技术。对比于传统的二维成像技术，超声相控阵三维成像的主要优点是^[107-108]：(1) 提高了损伤检出的准确率，减少了误检和漏检的风险；(2) 精确表征损伤的体积；(3) 检测范围广，成像效率高。因此，三维可视化成像技术具有广阔的市场应用前景，是当前工业无损检测的一个研究热点。

三维超声图像的重构主要基于两种采集方式的数据^[107]：一种是基于带有位置编码器的一维线性相控阵探头采集的数据；另一种则是基于二维矩形排列的相控阵数据。这两种方式的优劣列于表 3 中。

因一维线阵换能器成本低，被广泛应用于复合材料中的三维超声图像的重构。由于复合材料的多层边界造成的结构噪声，使采用三维可视化表征的损伤大小不够精准。对此，Mohammad-

表 3 三维图像重构的两种数据采集方式的优劣

Table 3 Advantages and disadvantages of two data acquisition methods for 3D image reconstruction

Data acquisition method	Advantage	Disadvantage
1D linear array	Low cost	Complex detection process and slow detection speed ^[111] , low resolution ^[112]
2D array	Fast detection speed, high imaging spatial resolution ^[111]	High cost, complex acoustic beam control algorithm

khani 等^[109]提出基于小波变换和提取结构噪声统计均值和标准差的智能阈值技术，更精确地实现了损伤的三维成像。另外，为实现快速且实时化的损伤三维成像，如图 13 所示，Bulavinov 等^[110]

利用相控阵基于合成孔径技术获取 B 扫描图像，再将这些 B 扫描图像合成为损伤的三维图像。基于一维阵列探头采集的数据，也实现了复合材料中冲击损伤和孔隙损伤的三维可视化成像。

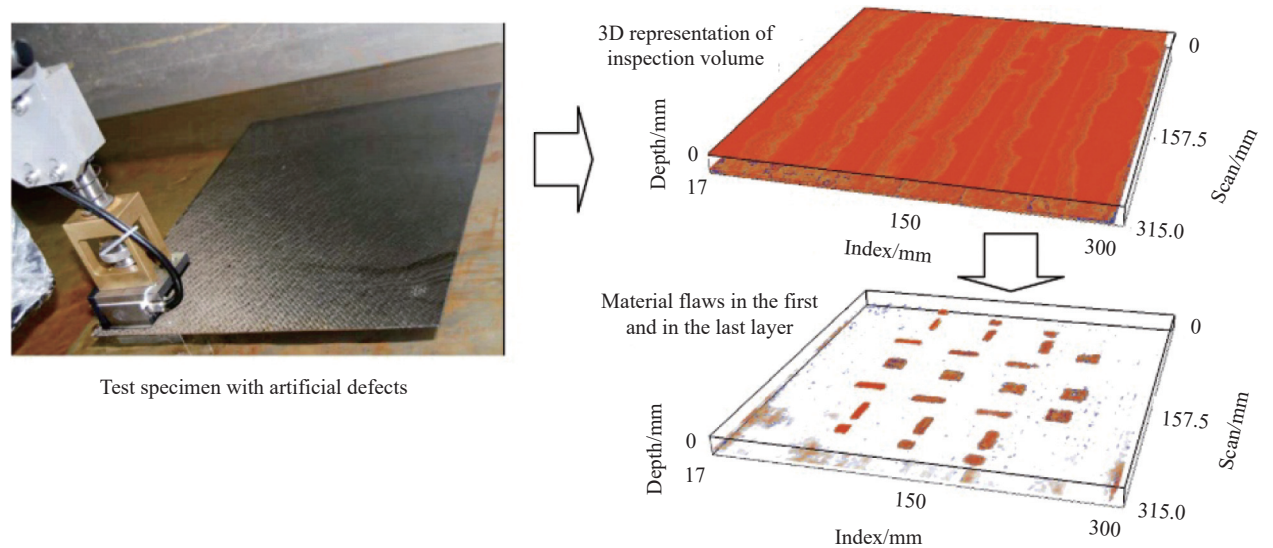


图 13 碳纤维复合材料损伤的三维可视化成像^[110]
Fig. 13 Three-dimensional visualization imaging of carbon fiber composite damage^[110]

利用二维面阵对待测物体发射聚焦光束进行体积扫描，从而实现损伤的三维可视化表征，如图 14 所示。基于面阵探头的三维图像重构的优点就是扫查速度快和高的空间分辨率^[113]。

设备从物体外部实测获得投影数据，通过建立投影数据与超声传播路径和声速参数分布组成的模型方程之间的关系，反演出物体内部的二维图像。

超声层析成像按照采集方式的不同，可以分为透射式和反射式。透射式层析成像最先被提出和应用，最初的假设声波按照直线传播，类似于 X 射线，但在实际中声波往往存在折射和衍射的特征，在不同介质的界面处会发射折射和衍射的现象。因此，Lytle 等^[114]基于射线追踪方法，反复迭代更新超声波以反演出实际的超声波的传播路径，从而获得物体内部损伤的成像。反射式层析成像^[115]则用于大尺度结构的损伤成像，基于置于检测物体一侧的换能器的测量数据，通过滤波-反投影法以重建损伤的形貌。Jansen 等^[116]在反射式采集方式下，利用 Lamb 波的声时和能量衰减等信息为层析成像所需的投影数据，实现了碳纤维复合材料中分层损伤的层析成像。然而，采用射线近似的假设，不适用于复合材料中的微小损伤，由于此时的损伤在投影的方向尺寸不大于低频导波的波长，从而出现较大的误差。对此，一些学者提出了基于波动方程的衍射层析成像方法。Wang 等^[117]基于波函数给出了由不均匀性引起的拉伸和弯曲平板波的散射现象的精确解。

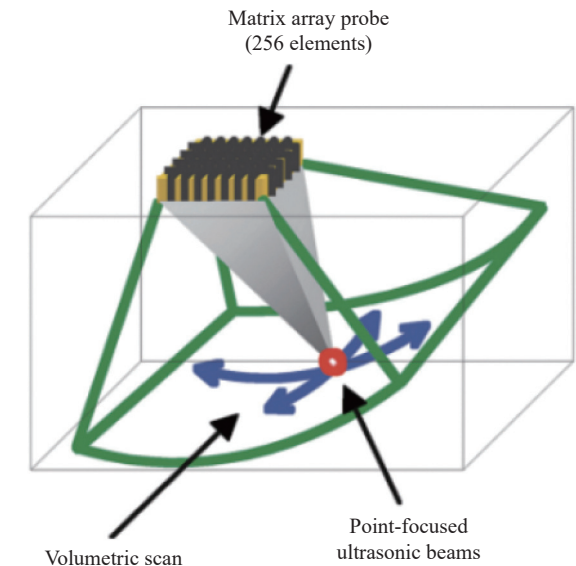


图 14 三维相控阵扫描示意图^[113]
Fig. 14 Schematic image of a scanning of 3D phased arrays^[113]

3.3 层析成像

超声层析成像是基于超声传播理论，由检测

为避免 Lamb 波在碳纤维复合材料中传播产生的复杂反射信号的特征提取困难，Su 等^[118]提出了基于希尔伯特能谱和 Lamb 波层析成像的损

伤识别方法，如图 15 所示，分别在仿真模拟和实验两方面都实现了碳纤维复合材料的单损伤和多损伤的定位成像。

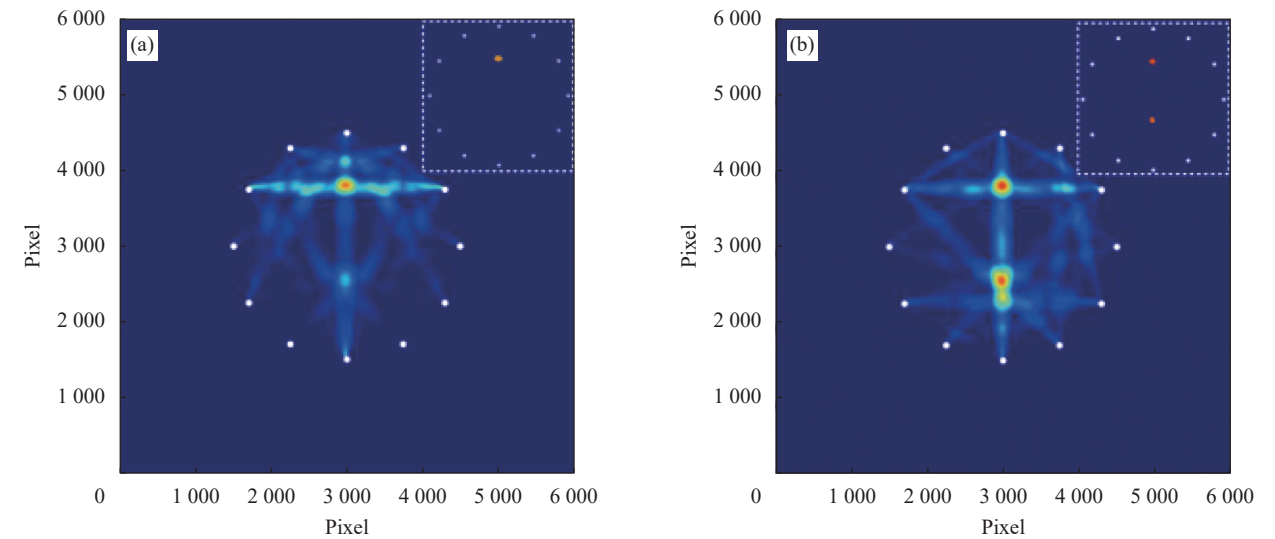


图 15 碳纤维复合材料的损伤层析成像结果^[118]

Fig. 15 Tomography results of damage in carbon fibre composites^[118]

3.4 逆时偏移成像

逆时偏移方法被认为是地质勘探领域中高精度的地质构造轮廓的成像方法^[119-123]。它是一种基于波动理论的深度域偏移方法，可以呈现出极其复杂的地层结构模型的轮廓图像^[124-126]。按照处理资料的不同，可以分为叠后和叠前逆时偏移成像^[127]。目前，在超声无损检测领域，叠前逆时偏移方法广泛用于均匀介质和分层介质中的损伤成像^[128-131]。

叠前逆时偏移方法主要分为 3 步：(1) 通过求解波动方程，计算出激励换能器发射出的声波在介质中传播的正向波场 $S_i(x, z, t)$ ；(2) 通过逆时外推接收阵元接收到的信号，可以得到接收波场 $R_i(x, z, t)$ ；(3) 采用不同的成像条件进行成像，再对所有时刻的剖面进行叠加，得到最终的成像结果。常用的叠前逆时偏移成像条件有激发时间成像、振幅比成像和互相关成像条件^[128]。其中互相关成像条件应用最为广泛，源波场归一化互相关成像结果为

$$I(x, z) = \sum_i \frac{\sum_t S_i(x, z, t) R_i(x, z, t)}{\sum_t S_i^2(x, z, t)} \tag{5}$$

其中：(x, z, t) 为空间坐标和时间；i 为第 i 个阵元。

对于较薄的碳纤维复合材料层合板，采用频率相对较低可近似于 Mindlin 板理论的波模型，

从而利用叠前逆时偏移结合激发时间成像条件实现损伤的成像^[132]。进一步，为了提高成像的分辨率和效率，采用零延迟互相关成像条件对复合材料层合板中的损伤进行逆时偏移成像^[133-134]。

逆时偏移方法对于较薄的碳纤维复合材料板中的损伤，能够不受其频散的影响，较好地实现损伤成像，但是使用该方法时耗费的计算时间较长，计算数据量大，不适合用于损伤的在线监测。

3.5 概率成像

上述的 3 种成像算法中，全聚焦成像算法和三维可视化成像方法及逆时偏移成像方法都可用于基于体波检测技术的信号，实现损伤的检测成像。而概率成像^[135-136]则主要用于基于导波检测数据的损伤成像。该方法不依赖于结构的先验知识，如导波的传播模态和群速度等。该方法是基于概率的损伤检测重构算法，通过引入空间概率分布函数和信号损伤指数表征损伤。对于平面中某一点的成像幅值为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^k p_i(x, y) = \sum_{i=1}^k DI_i W_i[R_i(x, y)] \tag{6}$$

式中：k 是总路径数；DI_i 是第 i 条传感路径的信号损伤指数；W_i[R_i(x, y)] 是第 i 条传感路径对应的非负路径加权函数，代表第 i 条传感路径受损伤

影响的范围。上述公式表明空间中某点的成像点的幅值是以各路径的损伤指数因子乘上加权函数的结果，当成像幅值越大，则该点位置出现损伤的概率就越高。

概率成像方法因在成像过程中无需导波在结构中的模态和群速度的空间分布等先验知识，具有计算效率高并且能够有效识别碳纤维复合材料结构上的各种类型的损伤^[137-138]。Liu等^[137]结合虚拟时间反转和概率成像方法，对碳纤维复合材料中梯形、矩形和圆形等不同形状的损伤进行成像，如图16所示。由于基于导波的检测数据，其损伤形貌的成像结果不如C扫描的成像结果，然而其成像效率远高于C扫描技术。Mustapha等^[138]还研究了变厚度的碳纤维环氧树脂层压板和高性能泡沫夹芯组成的夹芯板中的导波传播规律，定义了单个传感路径的损伤指数，以检测锥形复合夹层板中的脱粘损伤。

然而，影响概率损伤成像诊断效果的因素有频率、传感路径网络及有效椭圆分布区域的大小等。对此，Wu等^[139]提出采用多个频率融合图像的方法以消除不同频率的影响，并针对其他影响因素提出了提高损伤识别效果的优化方案，成功提高了碳纤维复合材料加筋板上的损伤定位精度。对于传感网络的密度影响概率成像效果的问题，Liu等^[140]结合全求和方法 and 全乘法方法^[141]这两种图像融合方法，对概率成像方法进行了改进，以消除不均匀概率分布的影响，从而提高检测的准确性和可靠性。Zhu等^[142-143]基于机电阻抗结构健康监测方法提出了改进的概率加权损伤成像算法，有效地检测出蜂窝夹层复合材料结构内部的脱粘。

概率成像方法能够在未知导波的传播模态和群速度等先验知识下，基于引入的空间概率分布函数和实际测量到的信号差异对损伤的严重程度进行诊断。然而，在真实服役环境下，各接收信

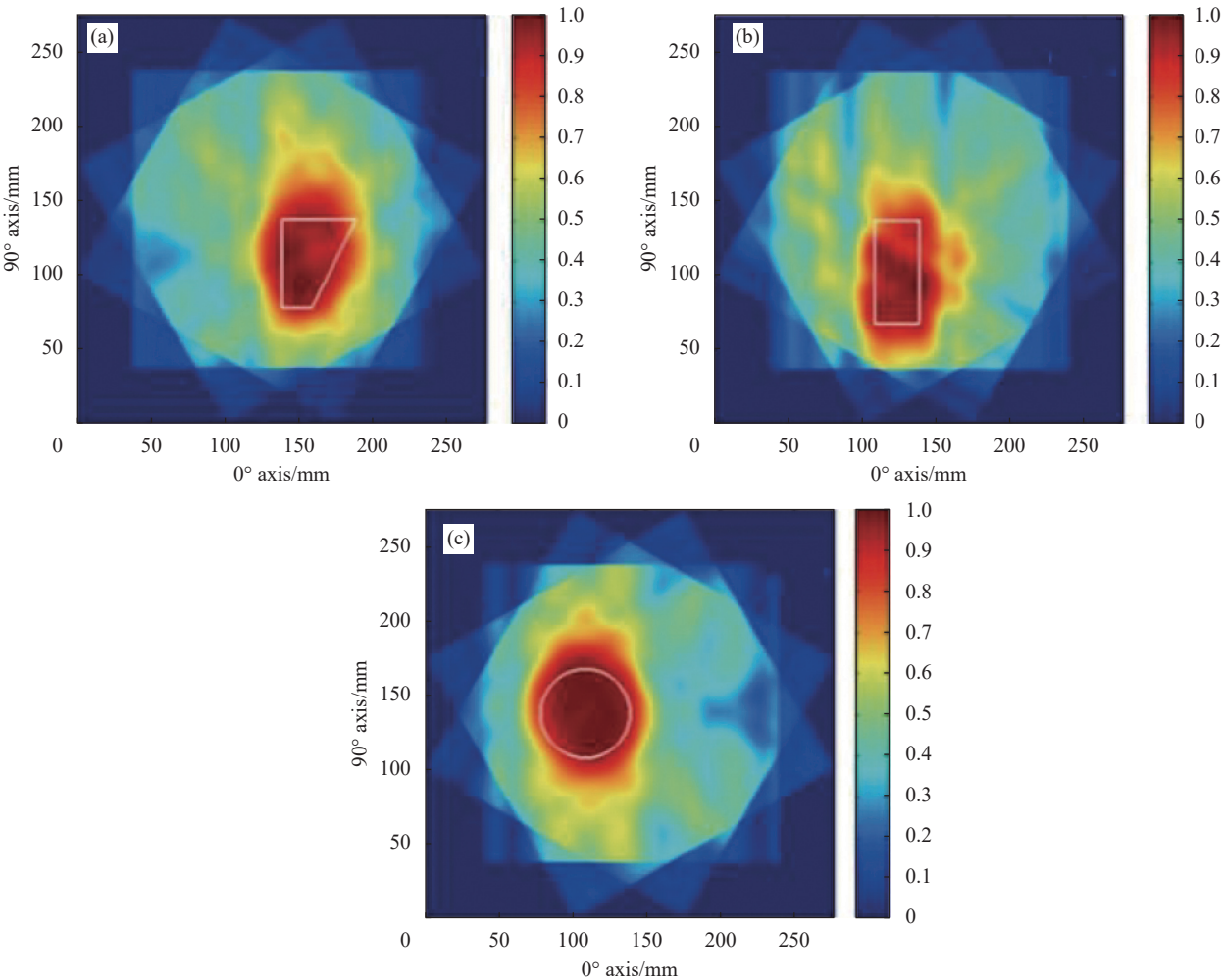


图16 碳纤维复合材料不同形状的损伤概率成像结果^[137]: (a) 梯形; (b) 矩形; (c) 圆形

Fig. 16 Probability imaging results of damage in carbon fiber composites with different shapes^[137]: (a) Trapezoidal; (b) Rectangle; (c) Circular

号之间产生差异的原因可能不仅仅来源于由损伤引起的超声导波散射信号，因此损伤诊断成像效果易受检测环境的影响。

3.6 5种成像方法的对比

对比并总结出以上5种成像方法的优劣及现有研究采用的波型和检测应用，列入了表4中。

然而，这5种成像方法的可靠性都依赖于碳纤维复合材料传播模型和换能器的设计与布局，因此在实际工业损伤检测诊断成像前，应准确测量各检测样品的各层厚度、弹性常数、密度及检测换能器的参数等。根据实际损伤诊断需求，选择相应的成像方法。

表4 5种成像方法用于碳纤维复合材料损伤的优劣
Table 4 Advantages and disadvantages of five imaging methods for carbon fiber composite damage

Imaging method	Wave type	Advantage	Disadvantage	Application
Total focus method	Body wave	Simple algorithm	Artifacts	Hole ^[51] , fiber wrinkle defect ^[32]
3D visualization imaging	Body wave	3D damage image	Large amount of data, complex process	Impact damage ^[110]
Tomography	Guided wave	No media prior knowledge required	Large amount of calculation	Delamination ^[116]
Reverse time migration	Guided wave	High accuracy	Large amount of calculation and storage space	Damage of thin plate of complex structure ^[133-134]
Probability-based diagnostic imaging	Guided wave	No media prior knowledge required	Vulnerable to environmental impact	Debonding damage ^[142-143]

4 主要挑战和未来的发展方向

应用于碳纤维复合材料的超声阵列检测技术在近几十年的发展中取得了很大的进步，且新技术和新手段的出现为该领域带来了新的发展动力和方向。但是，面临不断推出复杂结构的新型碳纤维复合材料，如何高效、可靠、精确地检测并评估出这些材料中各种类型的损伤仍然面临挑战。本节介绍了可能会面临的挑战和未来的发展方向。

4.1 主要的挑战

(1) 构建复杂环境下不同材料结构的声学模型

碳纤维复合材料可以分为树脂基、金属基、陶瓷基和橡胶基这4种常用形式，不同分类的基体材料所具备的性能优势并不相同，而且差异巨大。另外，一些由碳纤维复合材料组成的外形结构也十分复杂，例如L型、T形、Ω形等结构。未来的研究方向需要考虑在复杂环境条件下，建立这些不同材料结构的碳纤维复合材料中的声学模型，例如在水或者覆盖冰层中的碳纤维复合材料复杂结构的损伤检测。

(2) 研究超声波与不同损伤类型的作用机制

为了提高超声检测技术的损伤诊断能力，研究超声波与不同损伤类型的作用机制是十分重要的。这些研究内容包括超声波遇到不同的损伤类型的声散射能量和传播模式的变化等。

(3) 建立多场耦合传感网络

由于碳纤维复合材料的固化工艺与服役工况复杂，状态参数多，单一的传感技术难以获得定量表征复合材料结构状态所需的信息。因此，需要建立多场耦合传感网络。

(4) 优化损伤成像算法，实现在线实时成像

近年来，一些学者将并行计算、Graphics Processing Unit加速、多线程采集、Field Programmable Gate Array等现代计算机科学技术与阵列超声后处理成像技术相融合，初步实现了金属损伤的实时成像^[144-145]。然而，由于碳纤维复合材料的各向异性，其声时计算方法较复杂，需优化损伤诊断成像算法，实现基于各向异性声学模型的碳纤维复合材料的工业化实时成像。

(5) 建立定量评估损伤大小形状的标准

国内外主机厂对碳纤维复合材料平板中的分层等面积型损伤检测，已形成了相应标准，如国外ASTM E2580^[146]和E2533^[147]，国内GJB 1038.1A—2004^[148]和HB 7825—2007^[149]等。而对于其他类型的损伤检测没有统一标准，主要依赖检测人员的专业水平，从而无法一致地定量评估损伤的类型、大小和形状。

(6) 建立寿命评估与预测体系

随着碳纤维复合材料的大量使用，为节省维修成本和充分利用这些复合材料以达到经济利益最大化，对这些服役材料寿命的评估与预测是具

有广阔的市场应用需求的。

4.2 未来的发展方向

随着计算机技术的快速发展,使超声检测技术和成像方法在算法方面朝向更高精度、更便捷、更高效、更准确的方向去发展。

(1) 结合机器学习的损伤诊断算法

以机器学习为核心的人工智能在近几年高速发展,受到很多领域的广泛关注。在复合材料无损检测领域,先进传感技术与数据挖掘技术相结合是未来发展的一个趋势^[150]。传统的无损检测技术对专家经验过度依赖,底层信号特征易受环境因素影响,不同损伤或者条件下的损伤指数不通用。在“大数据”时代,将机器学习应用于无损检测领域,对庞大的数据进行训练,从而提高检测效率、精度和可靠性。

应用于无损检测领域的机器学习方法有人工神经网络(ANN)^[151-152]、深度神经网络(DNN)^[153]和支持向量机(SVM)^[154]等方法。ANN是模仿大脑神经网络结构和功能建立起来的信息处理系统,包含输入层、隐含层和输出层。DNN与ANN类似,通过建立多层隐含层的模型并训练庞大的数据集,以此获取更深层的信息。杨宇等^[155]利用偏斜感知的数据增强方法,建立了分布式时序神经网络模型,成功识别出碳纤维复合材料加筋板的冲击损伤。在缺乏训练数据的情况下,低维空间中建立非线性映射,从而将样本转换为高维空间,SVM具有较强学习能力和泛化能力^[156]。此外,高东岳^[157]基于随机森林回归模型,建立复合材料结构的损伤识别模型。杨宇等^[158]通过多机器学习模型对数据监测,提高了结构损伤识别的泛化能力,建立复合材料结构损伤识别方法。

机器学习在超声无损检测技术已经初步表现出准确性高、效率快等优势,但是在检测领域使用机器学习还面临一些挑战:(1)监测数据不完备,样本数量不足;(2)数据偏斜严重;(3)数据的采集和分析没有统一标准。面对这些挑战,在无损检测领域和结构健康监测领域需要做一系列的应对策略,例如建立大数据库、支持数据共享、完善核心算法、统一数据信息化标准等。

(2) 结合数字孪生模型的结构健康监测技术

损伤评估有4层:损伤检测/识别、损伤定位、损伤量化、对结构剩余使用寿命的预测。无损检测/结构健康监测技术目前关注点在损伤评估的

前3层,即制造和服役过程中检测到的损伤输出。尽管前3个层次很重要,但是将检测结果输入到结构剩余寿命模型中,从而构建结构状态预测的数字孪生模型,也是未来具有挑战性的工作。

5 结论

针对碳纤维复合材料中的损伤检测,系统地综述了在不损检测领域和结构健康监测领域常用的超声检测技术、损伤诊断成像算法的原理、特点和发展现状。

(1)超声检测技术是一种可靠的无损检测/结构健康监测手段,在碳纤维复合材料损伤检测领域具有广泛的应用前景。可有效地解决碳纤维复合材料的各种损伤类型的检测,具有操作简单、高效、成本低、检测精度高等特点。

(2)介绍了C扫描、相控阵、空气耦合、激光超声、光纤超声检测技术的原理,总结并对比了这些技术结合体波或导波检测的特点及用于碳纤维复合材料损伤检测的研究现状。

(3)综述了最具有代表性的损伤诊断成像方法,包括全聚焦成像、三维可视化成像、层析成像、逆时偏移成像和概率成像方法。各成像方法有不同的优缺点,应根据实际检测需求,选择合适的成像方法。

综合国内外发展的不足,关于碳纤维复合材料层合板损伤的超声检测与成像方面的后续研究建议需要从以下5个方面开展:复杂构件的声场模型的建立、损伤成像算法的优化、智能/高效/实时化的检测和成像系统的构建、损伤定量评估标准的建立、基于机器学习和数字孪生技术的应用。

参考文献:

- [1] 唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(3): 269-280.
TANG Jianmao. Review of studies of carbon fiber resin matrix composites[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(3): 269-280(in Chinese).
- [2] 王恒生, 程艳婷. 复合材料在航天领域中的研究与应用进展[J]. *化工科技*, 2013, 21(2): 67-70.
WANG Hengsheng, CHENG Yanting. Advance on research and application of the composite materials in the aerospace engineering[J]. *Science & Technology in Chemical Industry*, 2013, 21(2): 67-70(in Chinese).
- [3] 陈绍杰. 先进复合材料在汽车领域的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2011, 36(1): 11-17, 23.
CHEN Shaojie. Application of advanced composites on

- automotive filed[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2011, 36(1): 11-17, 23(in Chinese).
- [4] 曹弘毅. 碳纤维复合材料超声相控阵无损检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- CAO Hongyi. Research on phased array ultrasonic non-destructive testing technique of carbon fiber reinforced plastic[D]. Jinan: Shandong University, 2021(in Chinese).
- [5] 张祥林. 复合材料R角部位缺陷检测技术与超声C扫描检测工艺技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHANG Xianglin. Compound materials R angle spot flaw examination technology and supersonic C scanning examination processing technology research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012(in Chinese).
- [6] DEYDIER S, GENGEMBRE N, CALMON P, et al. Ultrasonic field computation into multilayered composite materials using a homogenization method based on ray theory[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2005, 760(1): 1057-1064.
- [7] GRAGER J C, SCHRAPP M, MOOSHOFFER H, et al. Ultrasonic imaging of carbon fiber-reinforced plastics using the full matrix capture data acquisition technique[C]//Proceedings of the World Conference on Nondestructive Testing. Germany: NDT. net, 2016: 1-11.
- [8] ZHOU B, GREENHALGH S. On the computation of elastic wave group velocities for a general anisotropic medium[J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2004, 1(3): 205-215.
- [9] DE LUCA A, CAPUTO F, KHODAEI Z, et al. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 138: 168-180.
- [10] XU C B, YANG Z B, ZUO H, et al. Minimum variance Lamb wave imaging based on weighted sparse decomposition coefficients in quasi-isotropic composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2021, 275: 114432.
- [11] HALL J S, MCKEON P, SATYANARAYAN L, et al. Minimum variance guided wave imaging in a quasi-isotropic composite plate[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025013.
- [12] SU Z Q, LIN Y, YE L. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3-5): 753-780.
- [13] MEI H F, GIURGIUTIU V. Guided wave excitation and propagation in damped composite plates[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(3): 690-714.
- [14] DATTA D, KISHORE N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method[J]. *NDT & E International*, 1996, 29(4): 213-223.
- [15] MEI H F, GIURGIUTIU V. Predictive 1D and 2D guided-wave propagation in composite plates using the SAFE approach[C]//Proceedings of the Health Monitoring of Structural and Biological Systems XII. Colorado: SPIE, 2018: 215-225.
- [16] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(2): 89-93.
- [17] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. *复合材料学报*, 2004(2): 111-116.
- ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing, LYU Donghui. Global matrix and its application to study on lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2004(2): 111-116(in Chinese).
- [18] LI F C, PENG H K, SUN X W, et al. Wave propagation analysis in composite laminates containing a delamination using a three-dimensional spectral element method[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012(5): 1-19.
- [19] HE C F, LI H Y, LI Z H, et al. The propagation of coupled Lamb waves in multilayered arbitrary anisotropic composite laminates[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2013, 332(26): 7243-7256.
- [20] MORA P, DUCASSE E, DESCHAMPS M. Transient 3D elastodynamic field in an embedded multilayered anisotropic plate[J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 106-115.
- [21] RAMADAS C, BALASUBRAMANIAM K, HOOD A, et al. Modelling of attenuation of Lamb waves using Rayleigh damping: Numerical and experimental studies[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(8): 2020-2025.
- [22] SHEN Y F, CESNIK C E S. Hybrid local FEM/global LISA modeling of damped guided wave propagation in complex composite structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 095021.
- [23] GRESIL M, GIURGIUTIU V. Prediction of attenuated guided waves propagation in carbon fiber composites using Rayleigh damping model[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(16): 2151-2169.
- [24] 周正干, 向上, 魏东, 等. 复合材料的超声检测技术[J]. *航空制造技术*, 2009, 330(8): 70-73.
- ZHOU Zhenggan, XIANG Shang, WEI Dong, et al. Ultrasonic testing technologies for composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 330(8): 70-73(in Chinese).
- [25] 汪林娜, 赵子华, 张峥. CFRP层压板超声C扫描检测可靠性影响因素分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2011(3): 20-23.
- WANG Linna, ZHAO Zihua, ZHANG Zheng. Reliability factors analysis in ultrasonic C-scan for CFRP laminates[J]. *Composites Science and Engineering*, 2011(3): 20-23(in Chinese).

- [26] ROTH D J, TOKARS R P, MARTIN R E, et al. Ultrasonic phased array inspection experiments and simulations for an isogrid structural element with cracks[C]//Proceedings of the AIP Conference Proceedings. Kingston: American Institute of Physics, 2010: 910-917.
- [27] YAN D, SUTCLIFFE M, WRIGHT B, et al. Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fibre-reinforced polymer[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2013, 55(9): 477-481.
- [28] LI L, CAO H Q, LUO Z B. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay correction[J]. *NDT & E International*, 2018, 97: 51-58.
- [29] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2012, 53(1): 8-17.
- [30] NAGESWARAN C, BIRD C R, TAKAHASHI R. Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP)[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, 48(3): 155-159.
- [31] 张海燕, 宋佳昕, 任燕, 等. 碳纤维增强复合材料褶皱损伤的超声成像[J]. *物理学报*, 2021, 70(11): 114301.
ZHANG Haiyan, SONG Jiaxin, REN Yan, et al. Ultrasonic imaging of wrinkles in carbon-fiber-reinforce-polymer composites[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(11): 114301(in Chinese).
- [32] 周正干, 朱甜甜, 马腾飞, 等. 先进树脂基复合材料纤维褶皱缺陷阵列超声全聚焦成像[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4384-4392.
ZHOU Zhenggan, ZHU Tiantian, MA Tengfei, et al. Array ultrasonic total-focus imaging for advanced resin matrix composite fiber wrinkle defect arrays[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4384-4392(in Chinese).
- [33] 徐娜, 沙正骁, 史亦韦. 超声相控阵延迟时间的声速校正及在复合材料中的检测[J]. *材料工程*, 2015, 43(9): 74-79.
XU Na, SHA Zhengxiao, SHI Yiwei. Velocity correction of delay time and inspection for composite materials using ultrasonic phased array[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(9): 74-79(in Chinese).
- [34] CAO H Q, GUO S F, ZHANG S X, et al. Ray tracing method for ultrasonic array imaging of CFRP corner part using homogenization method[J]. *NDT & E International*, 2021, 122: 102493.
- [35] MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO G M, et al. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics[J]. *Composite Structures*, 2015, 134: 845-853.
- [36] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRÍGUEZ G P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 131-142.
- [37] 曹弘毅, 马蒙源, 丁国强, 等. 复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估[J]. *材料工程*, 2021, 49(2): 149-157.
CAO Hongyi, MA Mengyuan, DING Guoqiang, et al. Delamination defects testing and evaluation of composite laminates using phased array ultrasonic technique[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(2): 149-157(in Chinese).
- [38] 周正干, 魏东, 向上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 24-28, 35.
ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang. Application of linear-frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultra-sonic testing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 24-28, 35(in Chinese).
- [39] 魏东, 周正干. 改进的非线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(16): 8-13.
WEI Dong, ZHOU Zhenggan. Application of non-linear frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultra-sonic testing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(16): 8-13(in Chinese).
- [40] 危荃, 金翠娥, 周建平, 等. 空气耦合超声技术在航空航天复合材料无损检测中的应用[J]. *无损检测*, 2016, 38(8): 6-11.
WEI Quan, JIN Cui'e, ZHOU Jianping, et al. Application of air-coupled ultrasonic technology for nondestructive testing of aerospace composites[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(8): 6-11(in Chinese).
- [41] 殷晓康, 周凯, 王雨婷. 空气耦合超声检测系统开发与测试[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(15): 79-83.
YIN Xiaokang, ZHOU Kai, WANG Yuting. Development and test of air-coupled ultrasound system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(15): 79-83(in Chinese).
- [42] 高双胜, 陆春, 薛继佳, 等. CFRP 复合材料层板冲击损伤的空气耦合超声无损检测[J]. *纤维复合材料*, 2015, 32(3): 10-12.
GAO Shuangsheng, LU Chun, XUE Jijia, et al. Nondestructive testing of impact damage in CFRP laminates by air-coupled ultrasound[J]. *Fiber Composites*, 2015, 32(3): 10-12(in Chinese).
- [43] 董方旭, 凡丽梅, 赵付宝, 等. 空气耦合超声检测技术在复合材料检测中的应用[J]. *无损检测*, 2022, 46(1): 10-13.
DONG Fangxu, FAN Limei, ZHAO Fubao, et al. Application of air coupled ultrasonic testing technology in composite testing[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2022, 46(1): 10-13(in Chinese).

- [44] IMIELIŃSKA K, CASTAINGS M, WOJTYRA R, et al. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: Glass, carbon and Kevlar/epoxy composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 157-158: 513-522.
- [45] SUN G K, ZHOU Z G, CHEN X C, et al. Ultrasonic characterization of delamination in aeronautical composites using noncontact laser generation and detection[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(26): 6481-6486.
- [46] 郭佳, 李四海, 宁宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. *航空工程进展*, 2014, 5(4): 487-490, 501.
GUO Jia, LI Sihai, NING Ning, et al. Application of laser ultrasonic technique in non-destructive testing[J]. *Advance in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(4): 487-490, 501(in Chinese).
- [47] 刘松平, 郭恩明, 刘菲菲, 等. 激光超声检测碳纤维增强树脂基复合材料的缺陷评估技术研究[J]. *无损检测*, 2007, 29(7): 396-398, 401.
LIU Songping, GUO Enming, LIU Feifei, et al. Evaluation of defects in carbon fiber-reinforced composites by laser ultrasonic technique[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(7): 396-398, 401(in Chinese).
- [48] VOILLAUME H, SIMONET D, BROUSSET C, et al. Analysis of commercial aeronautics applications of laser ultrasonics for composite manufacturing[J]. *Proceedings of ECNDT*, 2006: 1-8.
- [49] VANDENRIJT J F, LANGUY F, THIZY C, et al. Nondestructive inspection of aerospace composites by a fiber-coupled laser ultrasonics system[C]//*Proceedings of the Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering*. Angleur: SPIE, 2017: 299-307.
- [50] ZENG L M, WANG B D, LIU X, et al. High-resolution air-coupled laser ultrasound imaging of microstructure and defects in braided CFRP[J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100915.
- [51] 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.
- [52] GUO N Q, CAWLEY P. Lamb wave propagation in composite laminates and its relationship with acousto-ultrasonics[J]. *NDT & E International*, 1993, 26(2): 75-84.
- [53] YU L Y, GIURGIUTIU V. In-situ optimized PWAS phased arrays for Lamb wave structural health monitoring[J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2007, 2(3): 459-487.
- [54] AMBROZIŃSKI Ł, STEPINSKI T, UHL T. Efficient tool for designing 2D phased arrays in lamb waves imaging of isotropic structures[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(17): 2283-2294.
- [55] ENGHOLM M, STEPINSKI T. Direction of arrival estimation of Lamb waves using circular arrays[J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(5): 467-480.
- [56] WILCOX P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(6): 699-709.
- [57] KANNAJOSYULA H, LISSENDEN C J, ROSE J L. Analysis of annular phased array transducers for ultrasonic guided wave mode control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 085019.
- [58] YAN F, ROSE J L. Guided wave phased array beam steering in composite plates[C]//*Proceedings of the Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2007*. San Diego: SPIE, 2007: 142-150.
- [59] YAN F, LISSENDEN C J, ROSE J L. Directivity profiles of ultrasonic guided wave phased arrays for multilayer composite plates[C]//*Proceedings of the Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2009*. San Diego: SPIE, 2009: 340-350.
- [60] VISHNUVARDHAN J, MURALIDHARAN A, KRISHNAMURTHY C V, et al. Structural health monitoring of anisotropic plates using ultrasonic guided wave STMR array patches[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(3): 193-198.
- [61] LELEUX A, MICHEAU P, CASTAINGS M. Long range detection of defects in composite plates using Lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(2): 200-214.
- [62] PUREKAR A S, PINES D J. Damage detection in thin composite laminates using piezoelectric phased sensor arrays and guided Lamb wave interrogation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(10): 995-1010.
- [63] YU L Y, TIAN Z H. Guided wave phased array beamforming and imaging in composite plates[J]. *Ultrasonics*, 2016, 68: 43-53.
- [64] HUAN Q, CHEN M T, SU Z Q, et al. A high-resolution structural health monitoring system based on SH wave piezoelectric transducers phased array[J]. *Ultrasonics*, 2019, 97: 29-37.
- [65] CASTAINGS M, HOSTEN B. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates[J]. *NDT & E International*, 2001, 34(4): 249-258.
- [66] YAN F, HAUCK E, MOR PERA T, et al. Ultrasonic guided wave imaging of a composite plate with air-coupled transducers[C]//*Proceedings of the AIP Conference Proceedings*. Oregon: American Institute of Physics, 2007: 1007-1012.
- [67] LIU Z H, YU H T, HE C F, et al. Delamination detection in

- composite beams using pure Lamb mode generated by air-coupled ultrasonic transducer[C]//Proceedings of the International Conference on Advances in Structural Health Management. Jeonju: SAGE Publications LTD, 2014: 541-550.
- [68] LIU Z H, YU H T, HE C F, et al. Delamination damage detection of laminated composite beams using air-coupled ultrasonic transducers[J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 2013, 56(7): 1269-1279.
- [69] 吴霞, 卢超, 陈果, 等. CFRP 层压板缺陷同侧空气耦合超声兰姆波特征成像检测研究[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2018, 32(4): 52-58.
- WU Xia, LU Chao, CHEN Guo, et al. Study on eigenvalue imaging of CFRP plate defect using air-coupled ultrasonic lamb waves[J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2018, 32(4): 52-58(in Chinese).
- [70] ZHANG C, QIU J H, JI H L, et al. Laser ultrasonic imaging for impact damage visualization in composite structure[C]//Proceedings of the EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring. France: La Cité, Nantes, 2014: 2199-2205.
- [71] SALAMONE S, BARTOLI I, LANZA DI SCALEA F, et al. Guided-wave health monitoring of aircraft composite panels under changing temperature[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(9): 1079-1090.
- [72] GAO D Y, WU Z J, YANG L, et al. Structural health monitoring for long-term aircraft storage tanks under cryogenic temperature[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 881-891.
- [73] WANG Y S, GAO L M, YUAN S F, et al. An adaptive filter-based temperature compensation technique for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(17): 2187-2198.
- [74] SUN H, YI J Y, XU Y, et al. Identification and compensation technique of non-uniform temperature field for Lamb wave-and multiple sensors-based damage detection[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 1-14.
- [75] MARZANI A, SALAMONE S. Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30: 204-217.
- [76] HA S, LONKAR K, MITTAL A, et al. Adhesive layer effects on PZT-induced lamb waves at elevated temperatures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9(3): 247-256.
- [77] LU Y H, MICHAELS J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(9): 717-731.
- [78] TAKEDA N. Fiber optic sensor-based SHM technologies for aerospace applications in Japan[C]//Proceedings of the Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, & Systems. San Diego: SPIE-INT SOC Optical Engineering, 2008: 1-13.
- [79] 郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 93-98.
- HAO Xiaozhu, ZHANG Hanquan, WEI Chenglong, et al. Sea trial for fiber-optic hydrophone array used in marine geophysical exploration[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(3): 93-98(in Chinese).
- [80] ALCOZ J, JORGE LEE C E, TAYLOR H F. Embedded fiber-optic fabry-perot ultrasound sensor[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1990, 37(4): 302-306.
- [81] PAVEL F, KRISHNASWAMY S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 956-963.
- [82] ZHU Y P, HU L L, LIU Z G, et al. Ultrasensitive ultrasound detection using an intracavity phase-shifted fiber Bragg grating in a self-injection-locked diode laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5525-5528.
- [83] BETZ D C, STASZEWSKI W J, THURSBY G, et al. Multi-functional fibre Bragg grating sensors for fatigue crack detection in metallic structures[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part G*, 2006, 220(5): 453-461.
- [84] TSUDA H, LEE J R, GUAN Y S. Fatigue crack propagation monitoring of stainless steel using fiber Bragg grating ultrasound sensors[J]. *Smart Materials & Structures*, 2006, 15(5): 1429-1437.
- [85] TSUDA H, LEE J R, GUAN Y S, et al. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, 13(3): 209-214.
- [86] LAM P M, LAU K T, LING H Y, et al. Acousto-ultrasonic sensing for delaminated GFRP composites using an embedded FBG sensor[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(10): 1049-1055.
- [87] WU Q, YU F M, OKABE Y, et al. Application of a novel optical fiber sensor to detection of acoustic emissions by various damages in CFRP laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(1): 1-10.
- [88] TSUDA H. Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. *Composites Science & Technology*, 2006, 66(5): 676-683.
- [89] TSUDA H, TOYAMA N, TAKATSUBO J. Damage detection of CFRP using fiber Bragg gratings[J]. *Materials Science*, 2004, 39(6): 2211-2214.
- [90] SPYTEK J, MROWKA J, PIECZONKA L, et al. Multi-resolution non-contact damage detection in complex-shaped

- composite laminates using ultrasound[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 1-11.
- [91] STASZEWSKI W J. Intelligent signal processing for damage detection in composite materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(7-8): 941-950.
- [92] BENAMMAR A, DRAI R, GUESOUM A. Ultrasonic flaw detection using threshold modified S-transform[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(2): 676-683.
- [93] NAQUIDDIN M S M, LEONG M S, HEE L M, et al. Ultrasonic signal processing techniques for pipeline: A review[C]//Proceedings of the MATEC Web of Conferences. Malaysia: EDP Sciences, 2019: 1-11.
- [94] TIWARI K A, RAISUTIS R, SAMAITIS V. Signal processing methods to improve the signal-to-noise ratio (SNR) in ultrasonic non-destructive testing of wind turbine blade[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 5: 1184-1191.
- [95] ABDESSALEM B, REDOUANE D, AHMED K, et al. Enhancement of phased array ultrasonic signal in composite materials using TMST algorithm[J]. *Physics Procedia*, 2015, 70: 488-491.
- [96] WOYTOWICH B J. Detection of delamination defects in carbon fiber laminate composites using ultrasound and the Hilbert-Huang transform[D]. Boston: Tufts University, 2008.
- [97] 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.
- [98] GENGEMBRE N, CALMON P, PETILLON O, et al. Prediction of ultrasonic fields into composite multi-layered structures: Homogenization approach for the direct field and statistical approach for the inner reflections[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2003, 657: 957-964.
- [99] DEYDIER S, LEYMARIE N, CALMON P, et al. Modeling of the ultrasonic propagation into carbon-fiber-reinforced epoxy composites, using a ray theory based homogenization method[C]//Proceedings of the American Institute of Physics. Brunswick: Amer Inst Physics, 2006, 820: 972-978.
- [100] ROKHLIN S I, BOLLAND T K, ADLER L. Reflection and refraction of elastic waves on a plane interface between two generally anisotropic media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986, 79(4): 906-918.
- [101] DIJKSTRA E. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.
- [102] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
- [103] ZHOU H P, HAN Z D, DONG D, et al. A combined marching and minimizing ray-tracing algorithm developed for ultrasonic array imaging of austenitic welds[J]. *NDT & E International*, 2018, 95: 45-56.
- [104] PERLIN L P, DE ANDRADE PINTO R C. Use of network theory to improve the ultrasonic tomography in concrete[J]. *Ultrasonics*, 2019, 96: 185-195.
- [105] ZIELIŃSKA M, RUCKA M. Detection of debonding in reinforced concrete beams using ultrasonic transmission tomography and hybrid ray tracing technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 1-16.
- [106] PERKOWSKI Z, TATARA K. The use of Dijkstra's algorithm in assessing the correctness of imaging brittle damage in concrete beams by means of ultrasonic transmission tomography[J]. *Materials*, 2020, 13(3): 551.
- [107] FENSTER A, TONG S D, SHEREBRIN S, et al. Three-dimensional ultrasound imaging[C]//Proceedings of the Medical Imaging 1995: Physics of Medical Imaging. USA: SPIE-Int. Soc. Opt. Eng., 1995, 4549: 176-184.
- [108] 王婧云, 陈军, 叶伟龙, 等. 超声相控阵三维可视成像技术的发展与应用概述[J]. *无损探伤*, 2015, 39(6): 32-34.
- WANG Jingyun, CHEN Jun, YE Weilong, et al. Overview of the development and application of ultrasonic phased array 3D visual imaging technology[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2015, 39(6): 32-34(in Chinese).
- [109] MOHAMMADKHANI R, ZANOTTI FRAGONARA L, PADIYAR M J, et al. Improving depth resolution of ultrasonic phased array imaging to inspect aerospace composite structures[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 1-18.
- [110] BULAVINOV A, PINCHUK R, PUDOVNIKOV S, et al. Industrial application of real-time 3D imaging by sampling phased array[C]//Proceedings of the European Conference for Non-destructive Testing. Moscow: Int Committee Non-destructive Testing, 2010: 532-540.
- [111] 周正干, 李洋, 陈芳浩, 等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 371-378.
- ZHOU Zhenggan, LI Yang, CHEN Fanghao, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(2): 371-378(in Chinese).
- [112] FENSTER A, TONG S, CARDINAL H N, et al. Three-dimensional ultrasound imaging systems for prostate cancer diagnosis and treatment[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 1998, 1(4): 32-35.
- [113] KITAZAWA S, KONO N, BABA A, et al. Three-dimensional visualisation and evaluation techniques for volumetrically scanned data of ultrasonic phased arrays[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2010, 52(4): 201-205.
- [114] LYTLE R J, DINES K A. Iterative ray tracing between boreholes for underground image reconstruction[J]. *IEEE*

- [Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 1980, 18(3): 234-240.
- [115] 陈彦华, 兰从庆, 许克克. 反射式超声计算机层析成像算法研究[J]. [声学学报](#), 1992, 17(4): 301-307.
- CHEN Yanhua, LAN Congqing, XU Keke. A computation algorithm for ultrasonic reflective tomography[J]. [Acta Acustica](#), 1992, 17(4): 301-307(in Chinese).
- [116] JANSEN D P, HUTCHINS D A, MOTTRAM J T. Lamb wave tomography of advanced composite laminates containing damage[J]. [Ultrasonics](#), 1994, 32(2): 83-90.
- [117] WANG C H, CHANG F K. Scattering of plate waves by a cylindrical inhomogeneity[J]. [Journal of Sound & Vibration](#), 2005, 282(1-2): 429-451.
- [118] SU C H, JIANG M S, LIANG J Y, et al. Damage identification in composites based on hilbert energy spectrum and Lamb wave tomography algorithm[J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2019, 19(23): 11562-11572.
- [119] ETGEN J, GRAY S H, ZHANG Y. An overview of depth imaging in exploration geophysics[J]. [Geophysics](#), 2009, 74(6): 5-17.
- [120] BAYSAL E, KOSLOFF D D, SHERWOOD J W C. A two-way nonreflecting wave equation[J]. [Geophysics](#), 1984, 49(2): 132-141.
- [121] ZHOU H W, HU H, ZOU Z H, et al. Reverse time migration: A prospect of seismic imaging methodology[J]. [Earth-Science Reviews](#), 2018, 179: 207-227.
- [122] CLAERBOUT J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. [Geophysics](#), 1971, 36(3): 467-481.
- [123] BLEISTEIN N. On the imaging of reflectors in the earth[J]. [Geophysics](#), 1987, 52(7): 931-942.
- [124] KAELIN B, GUITTON A. Imaging condition for reverse time migration[C]//Seg technical program expanded abstracts 2006. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2006: 2594-2598.
- [125] BAYSAL E, KOSLOFF D D, SHERWOOD J W C. Reverse time migration[J]. [Geophysics](#), 1983, 48(11): 1514-1524.
- [126] SAVA P, HILL S J. Overview and classification of wave-field seismic imaging methods[J]. [The Leading Edge](#), 2009, 28(2): 170-183.
- [127] 丁亮, 刘洋. 逆时偏移成像技术研究进展[J]. [地球物理学进展](#), 2011, 26(3): 1085-1100.
- DING Liang, LIU Yang. Progress in reverse time migration imaging[J]. [Progress in Geophys](#), 2011, 26(3): 1085-1100(in Chinese).
- [128] YANG X B, WANG K, XU Y F, et al. A reverse time migration-based multistep angular spectrum approach for ultrasonic imaging of specimens with irregular surfaces[J]. [Ultrasonics](#), 2020, 108: 1-10.
- [129] YANG H J, LI J, WU D L, et al. Imaging a defect in layered media with different shaped interfaces using reverse time migration without velocity model known a priori[J]. [Ultrasonics](#), 2022, 124: 1-7.
- [130] 徐琰锋, 胡文祥. 纵向带状裂隙形貌的逆时偏移超声成像[J]. [物理学报](#), 2014, 63(15): 1-8.
- XU Yanfeng, HU Wenxiang. Ultrasonic imaging for appearance of vertical slot by reverse time migration[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2014, 63(15): 1-8(in Chinese).
- [131] MÜLLER S, NIEDERLEITHINGER E, KRAUSE M, et al. Reverse time migration: A seismic imaging technique applied to ultrasonic data[J]. [International Journal of Geophysics](#), 2012, 2012(11): 128465.
- [132] WANG L, YUAN F G. Damage identification in a composite plate using prestack reverse-time migration technique[J]. [Structural Health Monitoring](#), 2005, 4(3): 195-211.
- [133] HE J Z, YUAN F G. Damage identification for composite structures using a cross-correlation reverse-time migration technique[J]. [Structural Health Monitoring](#), 2015, 14(6): 558-570.
- [134] HE J Z, YUAN F G. A quantitative damage imaging technique based on enhanced CCRTM for composite plates using 2D scan[J]. [Smart Materials and Structures](#), 2016, 25(10): 1-11.
- [135] HAY T R, ROYER R L, GAO H D, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection[J]. [Smart Materials and Structures](#), 2006, 15(4): 946-951.
- [136] ZHAO X L, GAO H D, ZHANG G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring[J]. [Smart Materials and Structures](#), 2007, 16(4): 1208-1217.
- [137] LIU Z H, YU H T, FAN J W, et al. Baseline-free delamination inspection in composite plates by synthesizing non-contact air-coupled Lamb wave scan method and virtual time reversal algorithm[J]. [Smart Materials and Structures](#), 2015, 24(4): 1-15.
- [138] MUSTAPHA S, YE L. Propagation behaviour of guided waves in tapered sandwich structures and debonding identification using time reversal[J]. [Wave Motion](#), 2015, 57: 154-170.
- [139] WU Z J, LIU K H, WANG Y S, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J]. [Journal of Intelligent Material Systems & Structures](#), 2015, 26(16): 2181-2195.
- [140] LIU Z H, ZHONG X W, DONG T C, et al. Delamination detection in composite plates by synthesizing time-reversed Lamb waves and a modified damage imaging algorithm based on RAPID[J]. [Structural Control and Health Monitoring](#), 2016, 24(5): 1-17.

- [141] LIU Z H, YU F X, RU W, et al. Image fusion based on single-frequency guided wave mode signals for structural health monitoring in composite plates[J]. *Materials Evaluation*, 2013, 71(12): 1434-1443.
- [142] ZHU J J, WANG Y S, QING X L. A novel electromechanical impedance model for surface-bonded circular piezoelectric transducer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(10): 1-12.
- [143] ZHU J J, QING X L, LIU X, et al. Electromechanical impedance-based damage localization with novel signatures extraction methodology and modified probability-weighted algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 1-20.
- [144] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware[J]. *NDT & E International*, 2012, 51: 16-23.
- [145] NJIKI M, ELOUARDI A, BOUAZIZ S, et al. A real-time implementation of the total focusing method for rapid and precise diagnostic in non destructive evaluation [C]//Proceedings of the 2013 IEEE 24th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors. Washington: IEEE, 2013: 245-248.
- [146] ASTM. Standard practice for ultrasonic testing of flat panel composites and sandwich core materials used in aerospace applications: E2580[S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [147] ASTM. Standard guide for non-destructive testing of polymer matrix composites used in aerospace applications: E2533[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [148] 国防科学技术工业委员会. 纤维增强复合材料无损检验方法第1部分: 超声波检验: GJB 1038. IA—2004[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.
- National Defense Science TAIC. Non-destructive testing methods for fiber reinforced composites part 1: Ultrasound testing: GJB 1038. IA—2004[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2004(in Chinese).
- [149] 国防科学技术工业委员会. 复合材料制件无损检测对比试块制作与要求: HB 7825—2007[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2007.
- National Defense Science TAIC. Non-destructive testing of composite parts comparison test block fabrication and requirements: HB 7825—2007[S]. Beijing: National Defense Science TAIC, 2007(in Chinese).
- [150] FARRAR C R, WORDEN K. Structural health monitoring: A machine learning perspective[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012: 1-15.
- [151] SARAIVA F D E O, BERNARDES W M S, ASADA E N. A framework for classification of non-linear loads in smart grids using artificial neural networks and multi-agent systems[J]. *Neurocomputing*, 2015, 170: 328-338.
- [152] SIMONE G, MORABITO F C, POLIKAR R, et al. Feature extraction techniques for ultrasonic signal classification[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2002, 15(1-4): 291-294.
- [153] 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.
- [154] CACCIOLA M, CALCAGNO S, MORABITO F C, et al. Computational intelligence aspects for defect classification in aeronautic composites by using ultrasonic pulses[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(4): 870-878.
- [155] 杨宇, 王彬文, 吕帅帅, 等. 一种基于深度学习的复合材料结构损伤导波监测方法[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(7): 102-108.
- YANG Yu, WANG Binwen, LYU Shuaishuai, et al. A deep-learning-based method for damage identification of composite laminates[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(7): 102-108(in Chinese).
- [156] AGARWAL S, MITRA M. Lamb wave based automatic damage detection using matching pursuit and machine learning[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(8): 1-11.
- [157] 高东岳. 基于机器学习方法的超声导波结构健康监测研究[J]. *纤维复合材料*, 2020, 37(3): 3-8.
- GAO Dongyue. Ultrasonic guided wave structural health monitoring technology based on machine learning method[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(3): 3-8(in Chinese).
- [158] 杨宇, 周雨熙, 王莉. 一种集成多个机器学习模型的复合材料结构损伤识别方法[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(2): 278-287.
- YANG Yu, ZHOU Yuxi, WANG Li. Integrated method of multiple machine-learning models for damage recognition of composite structures[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2020, 35(2): 278-287(in Chinese).