

增韧树脂基碳纤维复合材料 结构无损检测技术研究

Nondestructive Testing Technolgy for Toughened Carbon Fiber
Reinforced Resin Composites

北京航空航天大学 张博明 叶金蕊 周正干
上海飞机制造有限公司 刘卫平 张冬梅 刘奎 于光 周晖



张博明

教授, 博士生导师。主要研究方向为复合材料制造、设计及健康检测, 多次获得国家、国防科技进步奖。现任北京航空航天大学与中国商用飞机有限责任公司共建民用飞机复合材料制造中心副主任, 主持并完成与上海飞机制造有限公司合作的“大客复合材料平尾等结构无损检测技术研究”项目。

机体结构的复合材料化程度是衡量飞机先进性的一个重要指标。近年来, 碳纤维复合材料正被积极应用于制造大型飞机的主承力结构, 先进复合材料以其优异的性能, 可以有效提高飞机的轻量化和

在复合材料结构件制造过程中, 缺陷无损检测(NDT)和质量无损评价(NDE)是必不可少的环节, 并已经融入复合材料从研究到最终装机的全过程。

高性能化水平。相关领域专家表示, 飞机结构复合材料化是大势所趋, 并将从根本上改变飞机的结构设计和制造传统。然而, 树脂基碳纤维复合材料是复杂的各项异性多相体系, 其质量存在离散性, 成型过程极其复杂, 环境控制、制造工艺、运输以及操作等都可能产生缺陷; 服役过程中在静载荷、机械损伤、疲劳、蠕变、过热等因素均会引起复合材料结构损伤。这些缺陷和损伤大大降低了结构使用寿命, 甚至还可能给飞机结构造成灾难性的后果, 因此, 缺陷无损检测(NDT)和质量无损评价(NDE)是必不可少的环节, 并已经融入复合材料从研究到最终装机的全过程。

在近 40 年的复合材料无损检测研究中, 人们尝试了很多无损检测技术和方法, 超声检测因具有灵敏度高、检测缺陷范围广、穿透能力

强、检测效率高、操作简单等优点而成为应用最广泛的方法。当前复合材料超声无损检测的研究主要集中在 3 个方面: 超声新技术、超声信号处理方法和均质体系的微观模型。而对于超声波与复合材料内部各种不连续结构(气孔、分层、夹杂、纤维与树脂界面等)相互作用的声学物理特征并没有给予过多的关注。超声新技术主要包括 TOFD、空气耦合、超声非线性、相控阵技术等^[1-3]。超声信号处理方法致力于通过数学手段, 解决噪声抑制的瓶颈问题, 如信号平均技术^[4-5]、滤波技术^[6-8]、频谱分析^[9]、相关技术^[10]、神经网络方法^[11-12]、时频分析(例如短时傅立叶变换^[13-14]、Vigner-Ville 分布^[15-16]、小波变换^[17]、Hilbert-Huang^[18-19]变换等)。均质体系的微观模型, 如经典的 Martin 模型^[20], 假设异质结构(如孔隙)为规则球形且半径相同,

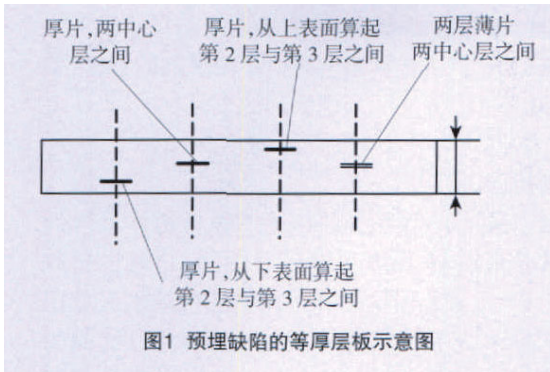


图1 预埋缺陷的等厚层板示意图

计算出衰减与半径四次方成正比,之后的工作都是在此基础上对异质结构形状进行修正^[21-22];这些方法虽然从细观尺度入手,但基本假设都是各向同性介质的声学物理规律,缺乏对复合材料自身结构的考虑。与传统的金属材料相比,复合材料具有声学准均匀性,即具有一定声敏感性的细观结构(如树脂纤维界面)使得超声时域波形存在稳定的结构噪声,在此噪声结构上,叠加纤维和树脂的衰减信息构成理想复合材料的本征波形。由于引起复合材料的声衰减因素(树脂、纤维、孔隙、空洞、分层、添加剂以及各种界面)众多且衰减程度十分严重,因此叠加了结构噪声、衰减后的超声波声场作用于缺陷,得到反射信号,使得超声检测对于复合材料中缺陷的识别及定量受到了很大的阻碍。目前,在含缺陷碳纤维复合材料(CFRP)超声衰减方面,国内外的相关研究建立了超声衰减与复合材料缺陷间的解析关系^[23-26],但模型仅局限于参数的获得,且并未考虑复合材料所含缺陷的大小、尺寸等微观信息,因此不具有普遍性。

本课题针对“大飞机”可能应用的增韧树脂基碳纤维复合材料结构,开展了一系列无损检测研究,包括超声无损检测、射线无损检测和红外无损检测,并将所得检测结果进行对比,同时重点针对超声无损检测缺陷识别进行理论研究和试验分析,并将所得结果与金相观察结

果对比,为复合材料无损检测技术作为大飞机关键技术之一的研究提供依据。

超声反射板法 C-扫描

1 检测方法与试样

要想进一步推广树脂基复合材料在航空大飞机上的应用,必须克服其对冲击破坏的敏感性,国外发达国家竞相发展研究了高韧性基体碳纤维复合材料,在预浸料制造过程中添加了化学物质,提高性能的同时也增加了检测超声波在材料内部缺陷区域和正常区域反射、衰减和共振差异的难度。航空用复合材料制件多数较薄,超声波在复合材料中的声衰较大,引起的噪声和缺陷发射信号的信噪比低,不易分辨。因此,本课题针对拟应用于大飞机的增韧树脂基的碳纤维复合材料进行了超声无损检测研究。

选取3种T300/增韧树脂复合材料,通过热压罐成型为 $320 \times 360 \times 4\text{mm}$ 的等厚层合板,采用准各向同性 $[45/0/-45/90]_2\text{S}$ 的铺层方法,通过预埋聚四氟乙烯的方法模拟分层缺陷的样件,缺陷尺寸分别为 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 9\text{mm}$ 、 $\phi 12\text{mm}$,聚四氟乙烯薄片厚为 0.025mm 、厚片为 0.127mm ,分别埋在层板上数第2层,中央层以及下数第2层、第4行为两层薄片折叠预埋,在等厚层板中央层,预埋缺陷样件如图1所示,两层薄片聚四氟乙烯片折叠预埋时,中间要留出空隙,以保证分层缺陷形成,保证超声波在此处信号响应幅值明显。

由于待检碳纤维层压板厚度较小,采用传统的脉冲回波法进行检测,难以保证复合材

料表面的缺陷的可靠检出。以预置缺陷检出为目标,采用水浸底波衰减法超声C扫描检测可以有效检出相应试样内预置缺陷及分布情况,检测设备如图2所示。

试验检测系统采用Panametric 5058PR作为超声波探头激励及接收装置,两轴C扫描架完成机械扫描过程,通过超声C扫描控制系统软件实现自动C扫描及数据存储。扫描过程如图3所示,超声传播过程如图4所示, F_s 为试样表面回波, B_1 为试样底面回波, B_2 为试样底面二次回波, W_1 为容器底反射板表面回波, W_2 为容器底反射板底面回波。实际检测中由于探头与试样表面距离及试样与容器底面距离的影响可能产生其他回波信号,甚至与已有信号产生叠加,需要通过调整确定各回波信号位置。检测中均采用 W_1 作为检测信号。

2 检测结果与分析

树脂基碳纤维复合材料结构由于其各向异性的特点,超声无损检

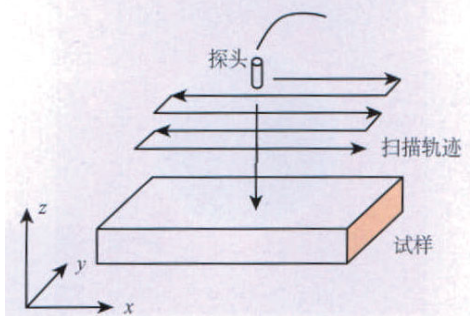


图2 C扫描检测过程原理图

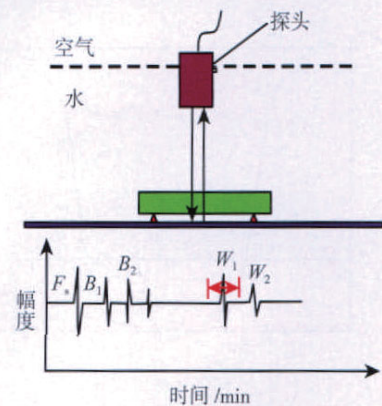


图3 声程传播路径示意图

测内部受纤维排布、树脂分布等影响,检测结果不可避免地存在不均匀现象,信号幅值与金属反映的不同,信号幅值在层合板各处均不同,对应的物理特性主要为所检测点的深度方向相对衰减系数。若材料中的相对衰减系数变化超出一定范围时,表明材料特性有较大变化,对材料结构强度等特性将会产生重要影响,此时可认为该位置为缺陷区域。相对衰减系数的表达式为:

$$A_r = 20 \log_{10} \frac{V_D}{V_{WD}}$$

其中, V_D 为疑似缺陷区域的最小超声检测幅值均值,均值计算点数根据疑似区域直径选取; V_{WD} 为无缺陷区域的均匀幅值; A 为相对衰减系数。依据相对衰减系数可大致判断缺陷疑似区域,具体判断还要根据所选用的阈值来确定,材料体系、厚度、缺陷尺寸和缺陷位置对阈值均有影响。阈值表达式为:

$$F = V_D + (V_{WD} - V_D) \times S_r,$$

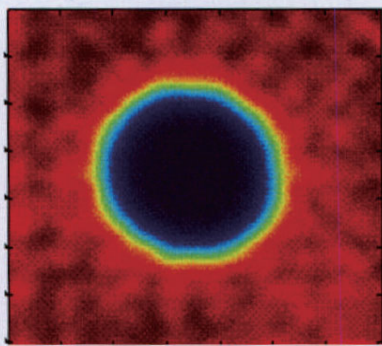


图4 彩虹样式映射C型显示图

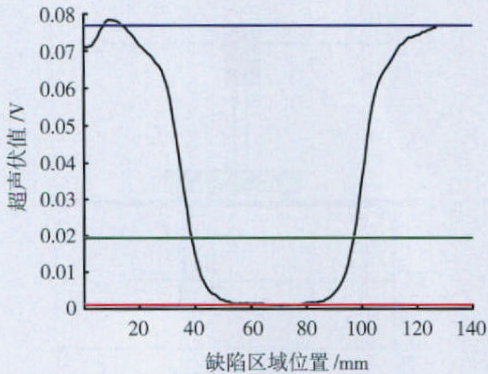


图5 缺陷区域单行数据曲线

其中, F 为阈值; A_r 为相对衰减量,根据以往脉冲回波检测法中衰减系数概念的原理确定,一般为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35,一般受试样厚度、缺陷尺寸的影响,针对增韧树脂基碳纤维复合材料。可以根据一系列缺陷尺寸标定并结合金相试验来确定相对衰减量。

缺陷尺寸的判定方法为:超声检测中要对缺陷尺寸进行判定,需要根据检测方法、探头焦距直径和试样厚度等因素对检测结果进行综合分析。对试样进行C扫描成像,遇到缺陷时,信号幅值有一个渐变过程,将C扫描图像进行彩虹样式映射时,可非常直观地体现出幅值的变化过程。如图5所示为10M探头以0.2mm步距,检测碳纤维复合材料板内预置缺陷的局部图像。但要准确判断缺陷尺寸,关键问题是如何判定图像中缺陷的边缘。对图像中数据进行分析,取图像中有缺陷区域的一行数据点绘制曲线,如图6所示。

要实现缺陷边缘的判定,就需要选取相应的阈值,如图5可见,若取绿线所示幅值为阈值,其与检测数据曲线的交点对应的位置值即可确定缺陷在该方向上的两侧边缘。对于图像而言,当确定了完整缺陷边缘后,得到如图7所示的二值化图像,即可根据面积值计算相应的缺陷当量直径。

3 缺陷尺寸量化分析

选取不同的超声相对衰减量,通过超声检测估算预埋的缺陷的尺寸,将所得结果与标样尺寸比较,同时与金相观察结果对比,可验证以上缺陷尺寸识别方法的有效性。图8给出了3种增韧树脂基碳纤维复合材料超声无损检测相对误差与实际预埋缺陷尺寸间的关系,相对误差 δ 为:

其中 D_e 为采用缺陷尺寸识别方法估算超声无损检测缺陷的直径, D 为实际预埋缺陷的直径。

$$\delta = \frac{D_e - D}{D},$$

图8给出了3种材料体系样件中预埋不同尺寸缺陷,并通过超声无损检测并采用上述的缺陷尺寸识别方法相对误差与实际尺寸之间的关系,给出了尺寸识别方法受相对衰减量的影响。从图中可以看出,不同尺寸的缺陷,尺寸识别时需采用不同的超声衰减量,针对4mm厚的试样,预埋缺陷尺寸不小于4mm时,

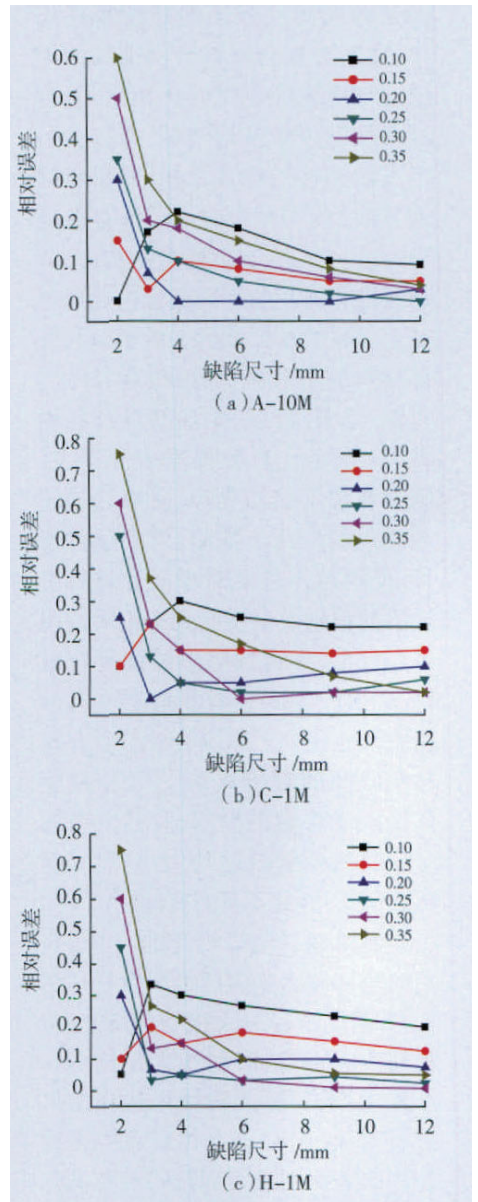
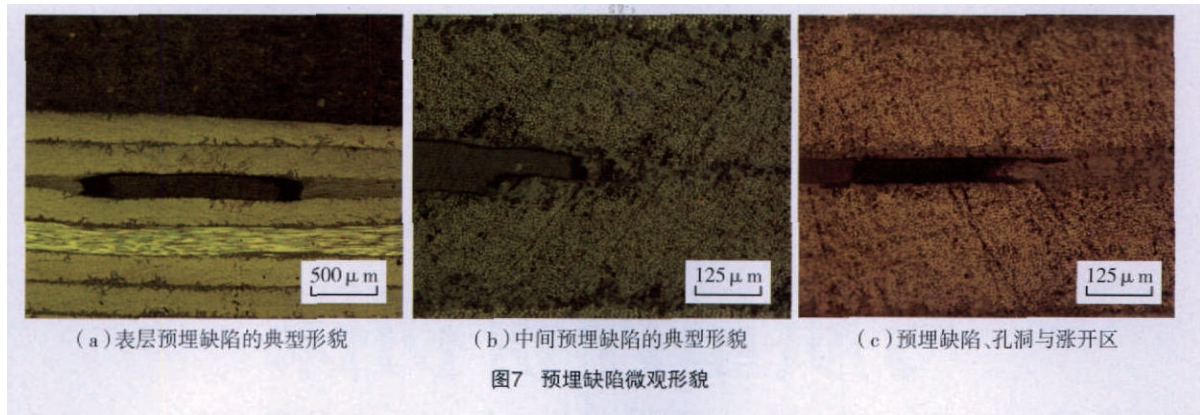


图6 A、C、H3种材料体系相对误差图



相对衰减量取 0.25 时识别尺寸相对误差较小, 曲线趋势变化平缓稳定; 缺陷尺寸小于 4mm 时, 相对衰减量不同, 所得的相对误差变化较大, 不同的材料体系、探头频率均对尺寸识别结果有影响; 对于缺陷预埋缺陷为 2mm、采用相对衰减量为 0.1 的情况, 缺陷识别精确, 缺陷变化趋势有明显的不同。本研究所采用的超声无损检测方法 C 扫描的分辨率为 2mm, 缺陷尺寸的定量检测误差为 $\pm 1\text{mm}$ 。

4 复合材料缺陷验证分析

复合材料层压板预埋缺陷进行机械剖析和金相观察, 利用金相显微镜 BX51M 进行金相观察并照相。试样磨至缺陷前端、缺陷刚出现时、缺陷最大尺寸处分别进行金相观察预埋缺陷影响区、测量预埋缺陷的长度和厚度, 对超声无损检测复合材料层合板的分层缺陷结果进行表征。

从图 9 金相图中可以看出缺陷的微观形貌, 通过测量, 缺陷尺寸与超声无损检测方法, 检测结果基本相符, 且对超声无损检测未处理前的“灰色地带”进行分析。预埋缺陷影响区的最前端为铺层“涨开区”, 被树脂填充, 靠近预埋缺陷有孔洞存在。孔洞与树脂填充区的大小差异较大, 与预埋缺陷厚度以及层压板压制质量有关。预埋缺陷成型后尺寸和实际预埋尺寸差异较小, 误差在 $\pm 3\%$ 内, 有些缺陷有一些翘

曲, 双层聚四氟乙烯错开。预埋缺陷实际尺寸、金相结果和超声无损检测缺陷尺寸识别结果吻合较好, 验证了以上方法的精确性。

红外和射线无损检测方法

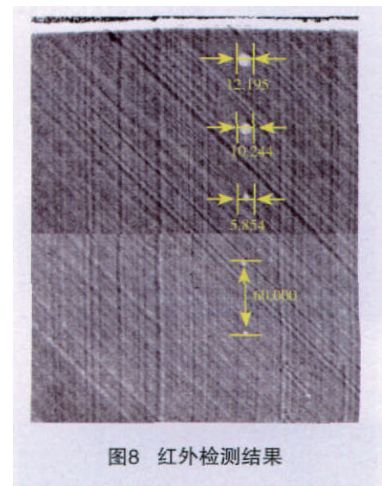
针对增韧树脂基碳纤维复合材料, 采用了红外和射线无损检测结果与超声无损检测结果进行了对比。

分别利用微焦点 X 射线机和常规 X 射线机对 2 块分别为 C 材料体系、H 材料体系复合材料层合板进行了 X 射线检测试验。X 射线检测是基于射线穿过不同材料时衰减量不同引起透射射线强度的变化, 而在胶片上呈现明暗不同的影像, 从而检测出被测物体中存在的缺陷。影响射线衰减的主要物理因素是材料密度。针对以上 2 种材料, 未检出缺陷, 其原因为: (1) 由于预埋缺陷与基体密度相近有关; (2) X 射线不适于面积型缺陷的检测, 只有当缺陷平面与射线束大致平行时方能检出。

利用红外热波技术对 2 块 C 材料体系、H 材料体系复合材料层合板进行无损检测。检测结果如图 8 所示, 红外热波法能够清晰地检测出近表面预埋缺陷, 且检出的缺陷尺寸与实际预埋缺陷尺寸接近。

结束语

本文给出了针对树脂基碳纤维



增强复合材料缺陷识别的超声无损检测方法, 并以 4mm 厚的 3 种含预埋缺陷的增韧树脂基复合材料层合板为研究对象, 采用以上缺陷识别方法对检出缺陷尺寸进行研究, 并与金相结果、实际预埋尺寸以及其他超声无损检测方法进行对比, 验证了缺陷尺寸识别方法的有效性。

针对 4mm 厚树脂基复合材料层合板, 缺陷直径不小于 4mm, 计算缺陷尺寸时相对衰减量取 0.25; 缺陷直径小于 4mm, 影响因素较多; 缺陷直径 2mm 时, 相对衰减量取 0.1。

针对增韧树脂基碳纤维复合材料所采用的超声无损检测方法 C 扫描的分辨率为 2mm, 缺陷尺寸的定量检测误差为 $\pm 1\text{mm}$ 。

本文共有参考文献在 26 篇, 因篇幅所限未能一一列出, 读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)