

复合材料冲击损伤超声回波特性及其成像检测*

Evaluation of Impact Damages in Composites Laminates Based on Pulsed Ultrasound Reflection and Imaging Method

北京航空制造工程研究所 刘松平 傅天航 刘菲菲 史俊伟 刘勋丰



刘松平

研究员, 俄罗斯国立莫斯科大学理学博士, 全国无损检测学会常务理事, 《无损检测》杂志副主编, 中国复合材料性能测试与检测专业委员会秘书长, 长期从事复合材料及焊接超声可视化成像无损检测技术的研究与应用开发, 发表论文 90 余篇。

复合材料冲击损伤的评估和无损检测, 对于复合材料设计、制造和工程应用与服役都显得非常重要。在众多的无损检测方法中, 超声是目前用于复合材料冲击损伤检测与评估的一种最为重要的方法。

冲击损伤是复合材料制造、特别是使用过程中容易产生的一种损伤形式, 由于复合材料自身工艺结构特点和破坏模式的不同, 复合材料设计、工艺、制造和工程应用与服役过程中都非常关注其冲击损伤及其损伤行为。一方面, 飞机复合材料化设计应用, 需要研究和掌握复合材料在受到冲击载荷作用下产生的损伤行为, 以及损伤对复合材料力学性能, 如冲击压缩、拉伸强度等的影响, 从中获取复合材料工艺或者结构优化信息, 以获得设计要求的预期冲击性能, 从而为设计确定复合材料结构安全使用阈值, 提供基础数据; 另一方面, 在实际工程应用和服役过程中, 各种意外的冲击或者飞机飞行过程中受到的外部飞行物的撞击等, 都可能会由此而产生损伤, 而且由于复合材料层压和吸能的特点, 冲击损伤

在复合材料表面目视几乎并不明显, 但其内部损伤可能已经超过了设计要求的损伤容限值。因此, 复合材料冲击损伤的评估和无损检测, 对于复合材料设计、制造和工程应用与服役都显得非常重要。在众多的无损检测方法中, 超声是目前用于复合材料冲击损伤检测与评估的一种最为重要的方法^[1-4]。本文通过分析和研究脉冲超声波在碳纤维增强树脂基复合材料中的回波特性, 采用高分辨率超声成像检测技术, 揭示复合材料层压结构中冲击损伤的特点及冲击引起的损伤分布, 实现复合材料冲击损伤的超声可视化成像评估与检测。

复合材料中脉冲声波反射行为

入射声波在材料中的传播行为与其内部微结构密切相关, 碳纤维

* 无损检测技术教育部重点实验室基金项目 (200929009)、国家自然科学基金项目 (60727001 和 60572099)。

增强树脂基复合材料作为一种声学介质,其显著的特征之一,就是其内部存在大量的层间反射界面,声波衰减剧烈,通常缺陷超声检测方法主要是基于长波理论,使入射声波的波长 λ 大于单个铺层的厚度 h_i ,通常 $h_i \approx 0.125\text{mm}$,入射声波在这种复合材料中的反射行为与波长有关^[5]。采用超声反射法进行冲击损伤等缺陷检测时,首先必须考虑超声检测表面盲区和纵向检测分辨率,确保出现在各个层间界面的缺陷或者损伤能够被检出;其次必须考虑入射声波在这种层状介质中的反射行为。

(1) 脉冲回波特性与表面检测盲区。

在其他条件一定时,提高超声检测分辨率、减小表面检测盲区的一个重要技术途径就是改善激励脉冲信号的品质和单周特性,如图1(a)所示,对于垂直入射方式,来自材料表面的声波反射信号 F 由于其声波脉冲的占宽 t_w^p 会导致检测盲区 h_w^p ,即当损伤出现在 $0-h_w^p$ 时,此时来自损伤的超声反射信号会因叠加在 F 信号中,而难以在时域内识别来自损伤的反射回波信号,从而导致损伤识别困难。例如,当 $t_w^p=1.2\mu\text{s}$,表面检测盲区 $h_w^p \approx 1.8\text{mm}$,这对于复合材料层压结构,显然是不能容忍的。理想的情况是尽可能使 t_w^p 小,当 $h_w^p \rightarrow h_i$ 时,即可认为无表面检测盲区,此时,即使当缺陷或损伤出现在第一个铺层时,也能被检出。

(2) 声波反射与缺陷识别。

入射声波在复合材料层状介质

中的传播行为与声波的波长 λ 有关^[6-7],在 $\lambda \gg h_i$ 时,复合材料结构被入射声波视为均匀层状声学介质,声波将不会在复合材料层间界面产生时域可分辨反射回波信号。当复合材料内部没有缺陷或者损伤时,入射声波 P 在复合材料内部传播,到达复合材料底面形成反射回波 B ;当复合材料内部存在缺陷或损伤时,由于缺陷的存在会明显改变复合材料的均匀性,入射声波传播途经缺陷区时,会引起入射声波的强烈反射,形成缺陷回波 D ,参见图1(b)图示,声波反射的强度(能量)将与缺陷的性质(如密度、弹性常数)有关:

$$R = \frac{v_D \rho_D - v_C \rho_C}{v_D \rho_D + v_C \rho_C} \quad (1)$$

其中, v_D 、 ρ_D 分别为缺陷区介质的声速和密度, v_C 、 ρ_C 分别为复合材料的声速和密度, R 为入射声波在缺陷界面的声压反射系数,其值

$$h_D = \frac{1}{2} t_D v_C \quad (2)$$

因此,基于入射高分辨率脉冲声波在复合材料中的反射行为,利用式(1)和式(2)可以有效地获取其内部缺陷或损伤量化信息,实现超声成像检测。

扫描成像方法

针对复合材料结构及其冲击损伤的特点,试验采用北京航空制造工程研究所自主研制的CUS-21J超声自动扫描成像检测系统及FJ系列高分辨率超声换能器,检测系统主要由UPower-1超声单元、扫描控制单元、数据采集单元、信息融合单元、成像显示单元和计算机等组成,其中FJ系列高分辨率超声换能器纵向分辨率可达单个复合材料铺层厚度,扫描控制单元通过其自身的 x 、 y 、 z 扫描机构和数控系统,在检测系统计算机

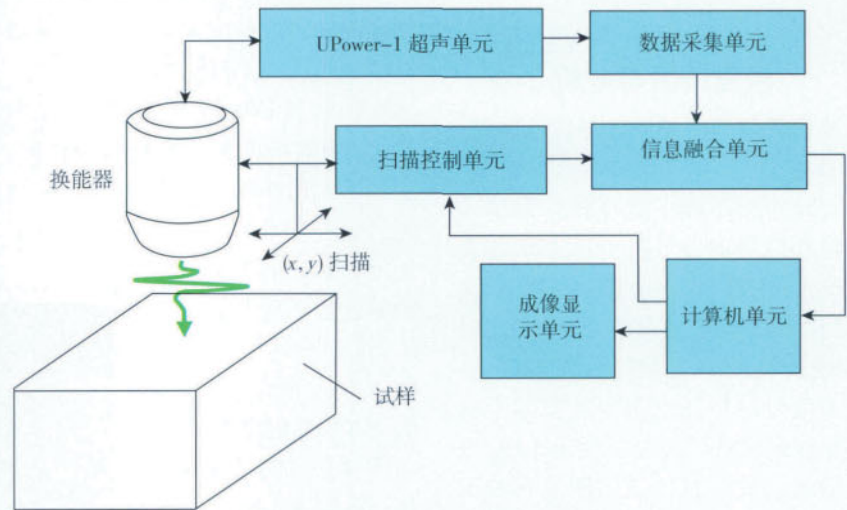


图2 复合材料超声扫描成像检测系统基本构成

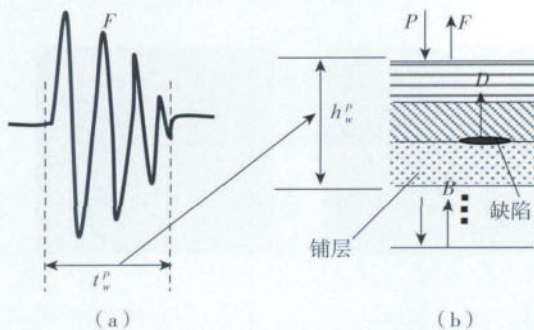


图1 脉冲回波特性与表面检测盲区

越大,表明声波反射越强烈。对于存在空隙的缺陷或损伤, $v_D \rho_D \gg v_C \rho_C$, $R \approx -1$,此时入射声波将会产生近似绝对反射。通过提取回波信号 F 和 D 之间的时间信息 t_D ,可以确定缺陷在复合材料中的深度:

和软件作用下,使换能器对被检测试样进行给定的超声A-、B-、C-、T-和H-扫描。通过对来自换能器的超声信号采集和位置信息的融合,实现超声检测扫描成像,参见图2所示。研究采用专门自动跟踪扫描技术^[7],使扫描过程中,信号闸门能够根据换能器与被检测零件表面之间的距离变化进行自动跟踪,从而准确

地获取所设置的扫描层深信号,进行正确的超声成像。

为了揭示脉冲超声波在复合材料内部的回波特性,进行冲击损伤超声成像检测,限于篇幅,本文介绍采用超声 A- 和 C- 扫描成像方法所得到的检测结果,其中,超声 C- 扫描成像方法是利用超声波沿垂直复合材料铺层方向传播时形成的时域回波信号,通过图像重构再现冲击损伤在不同层深位置铺层方向的分布,超声换能器在扫描机构的控制下,对被检测复合材料作 (x, y) 平面扫描,通过设计选择合理的信号闸门,将来自同一个检测位置的超声信息在同一个成像平面进行数据重构,即得到与换能器扫描平面平行的超声图像,即 C- 扫描。将超声断面 B- 扫描和 C- 扫描相结合,可以实现复合材料的多维可视化成像与缺陷检测评估。

检测结果与分析

1 冲击损伤与脉冲回波特性结果与分析

脉冲超声波在复合材料结构冲击损伤区的回波特性的一个重要表现形式,就是直接影响超声换能器接收到的超声 A- 显示信号的特征,对于损伤或者缺陷的检测而言,超声 A- 显示信号的特征反映出的实际上就是脉冲回波特性。为了便于比较,这里给出了复合材料结构缺陷和冲击损伤的回波特性,图 3 (a) 是一来自复合材料层压结构的典型超声反射回波信号,采用本文研究的高分辨率超声检测技术,垂直入射方式。试验用复合材料层压结构厚度为 4.6mm,采用预浸料层压工艺。图 3 (a) 中脉冲信号 *F* 来自入射声波在试样表面的反射, *B* 来自入射声波在试样底面的反射。采用北京航空制造工程研究所研究的 FCC 系列超声检测仪器和 FJ 系列高分辨率复合材料超声

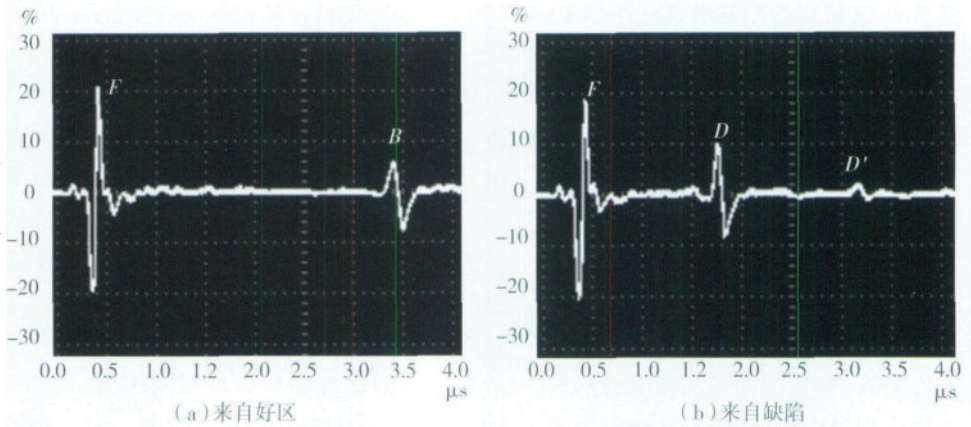


图3 来自复合材料的典型超声回波信号特性

换能器,产生具有单周脉冲特性的入射声波。从图 3 (a) 中可以清晰地看出,脉冲回波信号具有很好的单周特性,除了入射声波在复合材料层压结构表面和底面产生了反射,形成回波信号 *F* 和 *B* 外,图中没有出现来自复合材料层间界面的反射回波信号。这是因为所用的入射声波波长 ($\lambda \approx 0.7\text{mm}$) 明显比复合材料单个铺层的厚度 ($\approx 0.125\text{mm}$) 大的多。

图 3 (b) 是一来自实际复合材料层压结构缺陷区的超声回波信号,试样的材料和成型工艺及厚度与图 3 (a) 中对应的复合材料结构相同。从图 3 (b) 中可以清晰地看到来自复合材料层压结构表面的声波反射信号 *F* 和来自其内部缺陷的声波反射信号 *D* (注:图中 *D'* 为 *D* 的二次反射信号),且图中 *F* 和 *D* 相位相反,与图 3 (a) 的结果相比,图 3 (b) 中没有出现声波信号 *B*。这是因为入射声波在缺陷区产生了全反射 (即 $R \approx -1$),而且从图中同样可以清晰地看出脉冲回波信号具有很好的单周特性。

图 4 是来自实际冲击损伤试样的一组典型 A- 显示回波信号,图中给出了好区

和冲击损伤区不同位置点的典型脉冲回波特征信号,即超声 A- 显示回波信号,试样材料结构和工艺与图 3 中所用试样相同,只是厚度为 4mm,信号记录时仪器的显示增益有所变化,而且复合材料层压结构经历了冲击损伤,冲击能量为 4.5mJ。

图 4 (a) 是复合材料试样中好区的典型回波信号,图中的脉冲回波特性除了重现图 3 中的单周特性外,在回波信号 *F* 和 *B* 之间没有出现缺陷信号,利用式 (2),可以测算材料中的声速 $v_c \approx 3292\text{m/s}$ 。

图 4 (b) 是来自试样中冲击损伤区位置 1 的超声脉冲回波信号,显然,在图 4 (b) 中只有来自冲击损

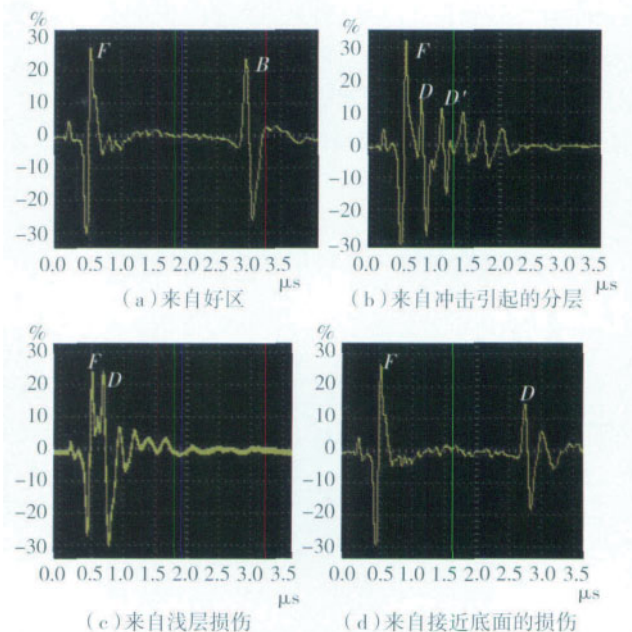


图4 来自复合材料的典型超声回波信号特性

伤的信号 D ,而且出现了信号 D 的多次反射特征,如图4(b)中的 D' 为 D 的二次反射信号,而没有出现图4(a)中的脉冲信号 B ,这是因为入射声波在冲击损伤区产生了全反射。从图4(b)来自冲击损伤反射信号在时间轴的位置和回波信号 D 的多次反射特征,可以非常清晰的看出图4(b)反映的是因冲击引起的试样浅层分层,其深度位置位于试样表面下约0.4mm。

图4(c)是来自试样中冲击损伤区位置2的超声脉冲回波信号,虽然在图4(c)中出现了来自冲击损伤的强烈回波信号 D ,但并没有出现信号 D 的多次反射特征,尽管图4(c)反映的是更浅层的损伤(离试样表面约0.3mm深)。

图4(d)是来自试样中冲击损伤区位置3的超声脉冲回波信号,与图4(b)和图4(c)不同是,图4(d)中的回波信号 D 反映的是位于复合材料试样靠近底面的冲击损伤,比较图4(d)中来自冲击损伤的回波信号 D 和图4(a)中来自底面的回波信号 B 的时间位置,不难看出这一特征,而且利用式(2)可以推算出该损伤距离试样表面约3.7mm深,接近试样底面(4mm厚),图4(d)中的结果还表明,即使距离试样表面0.3mm的损伤,采用这种方法,也能被清晰地检测出来。

因此,基于脉冲声波在复合材料中的反射回波特性和信号分布规律,不仅能清晰地检测出可能出现复合材料内部不同深度位置的损伤,而且还可以确定损伤的深度位置,这对复合材料损伤检测和指导复合材料结构损伤修理等都具有重要意义和作用。而且基于脉冲声波在复合材料中的这种回波特性,通过扫描方法,将位置信息和超声信息融合,还可以实现复合材料冲击损伤的超声扫描成像检测。

2 冲击损伤超声成像结果与分析

图5是基于脉冲声波回波特性,得到的一冲击损伤的超声C-扫描

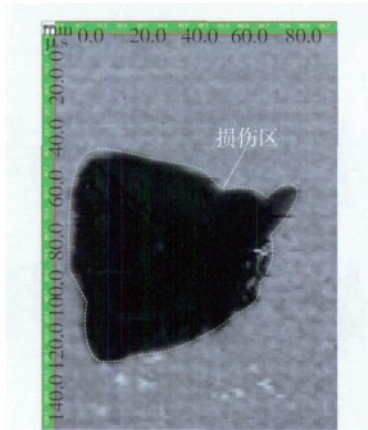


图5 冲击损伤超声T-扫描成像结果

成像结果,试样为碳纤维增强树脂基复合材料层压结构,材料和工艺与上述试样相同,只是试样的厚度为5mm,冲击能量为4.5mJ,图6是试验时冲击损伤球与复合材料试样表面作用点附近的光学照片,从图6中几乎看不到试样表面的目视

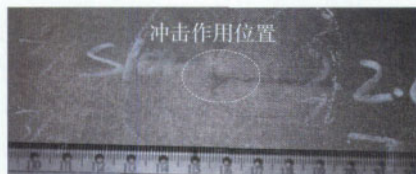


图6 冲击引起的复合材料表面目视损伤

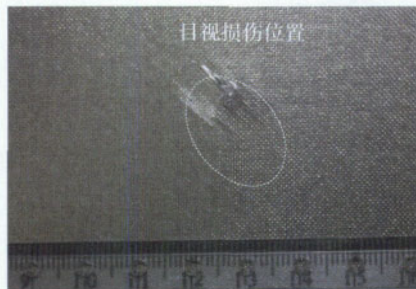


图7 冲击引起的复合材料背面目视损伤

冲击损伤。但从图5中超声C-扫描结果可以清晰地看出,因冲击载荷作用,在复合材料试样内部产生了非常显著的损伤,其损伤分布和面积可以从图5中清晰看出,如图中白色虚线所标示的黑色灰度分布区,根据图5中的灰度分布,可以直观地对损伤面积进行量化评估,其在垂直方向的最大取向长度达到68mm左右,而在水平方向的最大取向宽度则达到74mm左右。为了便

于比较分析,图7中还给出了从该试样背面得到的光学照片结果,从图虽然可以目视看到因冲击在复合材料试样背面引起的表面损伤,但其外表目视尺寸和面积同样比图5中超声C-扫描成像展现的内部损伤要小的多,这可以从图中的比例尺清晰看出,可见复合材料在受到冲击载荷作用时,其可能超声的损伤或者破坏往往要比表面损伤情况严重得多。

因此,基于脉冲声波的回波特性,利用超声C-扫描成像,可以准确得到复合材料内部冲击损伤的分布和损伤区域(面积)。

结论

(1)脉冲超声波在碳纤维树脂基复合材料中的回波特性,为冲击损伤的超声检测提供了有效机制,特别基于单周特性入射声波检测技术,可以有效地提高复合材料超声检测分辨率和减小表面检测盲区,对于0.3mm深的近表面损伤也可以清晰检出;

(2)基于脉冲声波在复合材料中的反射回波特性和信号分布规律,可以有效地检出复合材料内部不同深度位置的损伤,利用来自损伤的回波信号还可以确定损伤的深度位置,指导复合材料结构损伤修理。

(3)利用高分辨率脉冲声波在复合材料中的这种回波特性,通过扫描和位置信息与超声信息的融合,以超声C-扫描成像方式,能够准确直观地再现复合材料内部冲击损伤区域及其分布、面积等。超声成像结果表明,当复合材料受到冲击载荷作用时,由此引起的复合材料内部损伤会比表面损伤要严重得多。目前该项技术已经得到了大量的实际检测应用,取得了非常好的检测效果。

本文有参考文献7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 泰山)