

复合材料T-形R区超声反射法 检测与缺陷判别*

刘菲菲,刘松平,傅天航,李乐刚,白金鹏

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

[摘要] R区缺陷的检测是碳纤维复合材料结构中无损检测的焦点,针对此问题,以T-形R区为例,通过研究入射超声波在复合材料结构T-形R区产生回波信号及其特征,在典型超声检测试验验证分析基础上,提出了一种适用于复合材料结构T-形R区在线超声检测方法。系列超声检测与验证结果表明:采用水膜耦合超声检测技术,通过选择不同的声波入射方向,可有效地实现复合材料结构中T-形R区的覆盖检测;根据来自T-形R区的超声回波信号的时域特征可有效地进行缺陷的判别和确定检出缺陷所在铺层位置;表面检测盲区可达0.13mm(即单个复合材料铺层厚度)。解剖验证结果显示了超声检测结果与实际工艺缺陷的良好一致性。

关键词: 超声检测;复合材料;T-形R区;缺陷识别

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.05.043



刘菲菲

高级工程师,主要从事复合材料及焊接无损检测技术的研究与应用。

复合材料已成为现代飞机制造过程中的一种非常重要的选材,波音公司生产的787飞机复合材料的用量已达到其结构重量的50%;空客公司生产的A380飞机复合材料用量已达到其结构重量的25%,而A350则达到52%^[1]。目前复合材料装机应用水平已成为衡量飞机先进性的重要标志,未来飞机复合材料化已成为一个重要趋势。

随着各种复合材料承力结构不断推出,复合材料结构的无损检测就显得非常重要。由于超声对复合材料中的许多缺陷都有很好的检出能力,因此,超声是目前用于复合材料无损检测的一种非常重要的无损检测方法。通常需要针对不同复合材料特点和结构,设计不同的超声检测技术。例如,对于树脂基复合材料,目前实际应用效果最好的超声检测方法仍然是超声反射法和穿透法。

前者可以实现自动扫描检测和手动扫描检测,后者则以自动扫描检测为主,各有优缺点^[2]。超声波传播行为对材料不连续性的敏感性,使得超声方法对复合材料及其结构中的绝大部分缺陷具有很好的检出能力^[3-7]。其中超声C-扫描检测技术已成为目前复合材料结构件无损检测的一种非常普遍和有效的检测方法,并且得到了很好的工程实际应用^[2,8-10],利用超声3D扫描技术还可以实现复杂航空复合材料结构的自动扫描无损检测^[11]。

在大多数情况下,超声反射法是一种易于实现的复合材料无损检测方法,特别是有些较为复杂的复合材料结构和整体复合材料结构,往往存在许多复合材料蒙皮与加强筋几何连接部位。由于碳纤维的刚性特征,复合材料结构成型过程中,在蒙皮与加强筋连接部位会形成各种各样的

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61571409和60727001)。

几何过渡区,工程实践中,通常将这种过渡区简称之为R区,它起着一种结构机械过渡和一定的转载作用。因此,从结构的安全角度和工程结构的质量控制方面考虑,往往要求对R区进行无损检测。因其结构开敞性受限明显,超声反射法往往是不二的选择。不过,针对复合材料整体结构以及复合材料结构各种R区部位及其形状,往往需要研究专用的超声检测技术,才能有效地解决R区的无损检测,特别是复合材料整体结构中的T-形R区,因起到承载传递和结构连接等重要作用,必须进行可靠的无损检测。目前较为可行的T-形R区超声检测方法主要有:(1)超声接触法,采用固体延时块作传声柱,通过将固体延时块制成不同的形状,以适应T-形R区的接触耦合检测,包括采用单晶元换能器和多晶相控阵换能器,通常需要根据被检测的T-形R区进行专门的延时块设计,延时块与T-形R区表面之间采用硬接触耦合,但难以始终保证扫查过程中的良好声学耦合;(2)采用超声非接触法,通常利用水作为耦合介质,需要复杂的喷水耦合系统,在复合材料结构在线制造过程现场,通常不允许进行大量的喷水作业。本文针对复合材料结构T-形R区在线(即指复合材料结构在热成型后的制造工序现场)检测,介绍了一种基于多项专利利用的复合材料结构T-形R区超声检测方法。

T-形R区结构特点及检测要求

1 T-形R区结构特点

T-形R区是复合材料结构件和复合材料整体结构中的一种典型的结构形式,通常位于蒙皮与加强筋或立槽连接部位,如图1所示,它由复合材料蒙皮、复合材料加强筋或立槽、填充区3部分构成,可分为开敞和非开敞两种情况,其主要结构特点如下:

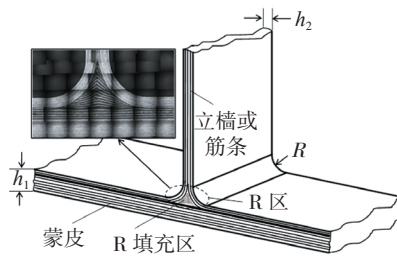


图1 复合材料层压结构中的T-形R区结构特点

Fig.1 Illustration of T-shape R-zone structure in composite laminates

(1) 因复合材料结构不同,R区的半径、表面状态变化不一;

(2) 加强筋或立槽纤维铺层和蒙皮中的纤维铺层会在其T-形R区形成填充区;

(3) 复合材料蒙皮的厚度(h_1)变化不一;

(4) 加强筋或立槽的厚度(h_2)变化不等;

(5) T-形R区的长度短则数百毫米,长则十几米不等;

T-形R区蒙皮单个纤维铺层厚度多在0.13mm左右(单向预浸料纤维铺层)。

2 T-形R区缺陷特点及检测要求

由于工艺参数的意外偏离,或者环境条件等主、客观原因,复合材料结构及其T-形R区在制造过程中可能会产生超过产品验收要求的缺陷,总结大量的实际检测应用案例,碳纤维复合材料结构T-形R区可能产生的缺陷有以下几种情况:

(1) 缺陷出现在T-形R区左右两侧蒙皮区,缺陷取向会沿R区圆弧方向分布;

(2) 缺陷出现在T-形R区左右两侧蒙皮-填充区界面,缺陷取向会沿R区圆弧方向分布;

(3) 缺陷出现在T-形R区下端对应的蒙皮区,缺陷取向会沿其铺层方向分布;

(4) 缺陷出现在T-形R区下端对应的蒙皮-填充区界面,缺陷取向会沿其铺层方向分布;

(5) 缺陷出现在T-形R区中填充区,缺陷取向与所用填充材料的特性与分布有关。

由于T-形R区是加强筋或立槽与蒙皮连接的关键部位,起到载荷传递和结构连接作用,因此,对于工程应用的复合材料结构要求对T-形R区进行100%覆盖检测,及时检出T-形R区可能存在的超过设计容限的R区缺陷,并提供检出缺陷的确切位置、深度、大小及其分布与性质等,以便进行产品的质量控制和工艺改进,同时为结构设计及结构强度分析提供确切的缺陷量化信息。

超声检测方法

1 入射角的选择要求

根据图1所示的复合材料结构T-形R区的结构特点、可能产生的缺陷及其部位和检测要求,选择超声反射法,如图2所示,使超声波从 P_1 、 P_2 、 P_3 3个不同位置和方向入射到T-形R区,以便获取最有利于检出T-形R区各个部位的缺陷,其中在位置 P_2 和 P_3 ,入射声波的方向通过改变换能器的摆角进行调节,如图2所示。具体步骤为:

(1) 选择位置 P_1 对下端T-形R区对应的部位进行检测;

(2) 选择位置 P_2 对左侧T-形R区对应的部位进行检测;

(3) 选择位置 P_3 对右侧T-形R区对应的部位进行检测;

(4) 沿着 P_4 所示的轴向扫查方向,对T-形R区进行扫查覆盖检测。

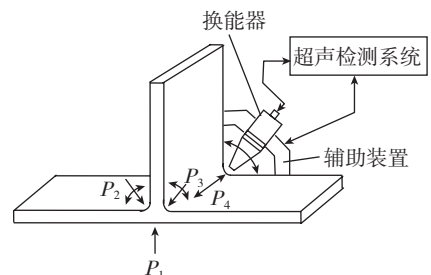


图2 超声反射法入射面的选择

Fig.2 Selection of ultrasonic incident directions

通过选择不同位置和入射方向和扫查方式,以确保有效地覆盖检出复合材料 T-形 R 区中可能产生的缺陷。

2 换能器及其辅助装置的选择

换能器选择主要考虑以下因素:

(1) 耦合效果。由于通常复合材料结构 T-形 R 区的表面远不如金属制件光滑和平整,显得非常粗糙,有时还会呈现凹凸不规则的变化(拉挤成型的复合材料筋条 R 区除外),采用固体作延时块的超声换能器进行接触法扫查时,难以保证扫查过程中的换能器与 R 区表面之间的声波耦合。因此,最好选择软接触或非接触耦合类换能器,而且还须便于制造现场原位检测。

(2) 分辨率和表面检测盲区。由于被检测复合材料 T-形 R 区的蒙皮单个铺层的厚度一般在 0.13mm 左右,要求检出 T-形 R 区各个铺层界面可能产生的缺陷,换能器与超声检测系统匹配,其表面检测盲区和纵向分辨率要求控制在 1~2 个铺层范围内。

(3) 换能器尺寸。根据被检测复合材料结构 T-形 R 区的圆弧半径 R 的大小选择换能器的尺寸,特别是换能器接触端的尺寸和直径尽量与 T-形 R 区的圆弧半径 R 相匹配。

(4) 辅助装置。为了保证扫查过程中换能器的稳定耦合和姿态(即入射方向),尽量使用与换能器配套的扫查辅助装置,参见图 2 中所示的辅助装置 2。

为此,针对开敞复合材料结构中 T-形 R 区超声检测,这里选择中航复合材料有限责任公司(中航复材)生产的专门用于复合材料 R 区检测的高分辨率超声换能器^[12],也可选择其中的 FJ-1W 或 FJ-2W 系列复合材料结构 R 区换能器,从位置 P_2 和 P_3 对 T-形 R 区左右侧进行超声检测;选择 FJ-1 系列复合材料换能器,从

位置 P_1 对下端 T-形 R 区对应的部位进行超声扫查检测(图 2)。对于非开敞式的内腔类的复合材料结构 T-形 R 区,采用中航复材生产的专门用于复合材料内腔 R 区检测的高分辨率超声换能器^[13]及超声扫查方法,对 T-形 R 区进行超声扫查检测。

3 超声检测仪器的选择

超声仪器的选择主要考虑以下因素:

(1) 分辨率和表面检测盲区。与超声换能器选择一样,超声仪器的选择要求检出 T-形 R 区各个铺层界面可能产生的缺陷,超声仪器与换能器匹配,其表面检测盲区和纵向分辨率要求控制在 1~2 个铺层范围内,确保近表面缺陷能有效检出;

(2) 适合复合材料结构制造现场的在线检测,特别是超声耦合剂的选择和使用不能对制造现场造成影响和污染;

(3) 复合材料超声自动扫描检测设备只有在复合材料结构离线时才适合选用。

对于复合材料结构 T-形 R 区制造过程中的在线检测,采用超声反射法扫查检测,选择复合材料超声检测仪器^[14],如 FCC-D-1/FCC-B-1 或 MUT-1 系列复合材料超声检测仪;对于超声自动扫查检测,选择复合材料超声自动检测设备^[15],如其中的 CUS-6000 系列的超声检测设备,超

声换能器与被检测 T-形 R 区表面之间采用水膜耦合,不会因过量的喷水耦合给制造现场带来工序污染或影响。

检测结果与讨论

图 3 是一组来自碳纤维复合材料层压结构 T-形 R 区中对应位置 P_2 左侧蒙皮部位的典型超声 A-显示回波信号及其特征。其中,图 3(a)来自 T-形 R 区中好区的典型超声 A-显示回波信号及其特征;图 3(b)来自 T-形 R 区中分层区的典型超声 A-显示回波信号及其特征,缺陷为预置分层,其大小约为 $\phi 6\text{mm}$,采用目前较为常用的聚四氟乙烯膜模拟分层的方法, R 区蒙皮由 12 个预浸料铺层构成,使分层位于位置 P_3 对应的 T-形 R 区左侧蒙皮近表面第 1~2 个铺层之间,单个纤维铺层的标称厚度约 0.13mm,即分层距 T-形 R 区蒙皮表面 1 个铺层深度,采用 MUT-1 复合材料数字式超声检测仪和 FJ-1W 系列换能器。

从图 3(a)可以非常清晰地看出:(1)来自 T-形 R 区蒙皮表面的声波反射信号,如图中 F 所标示的脉冲信号波形,简称 F 波或表面波,表明换能器与 T-形 R 区蒙皮表面声学耦合良好;(2)来自 T-形 R 区蒙皮-填料区界面附近的声波反射信号,如图中 B 所标示的脉冲信号波形,简称

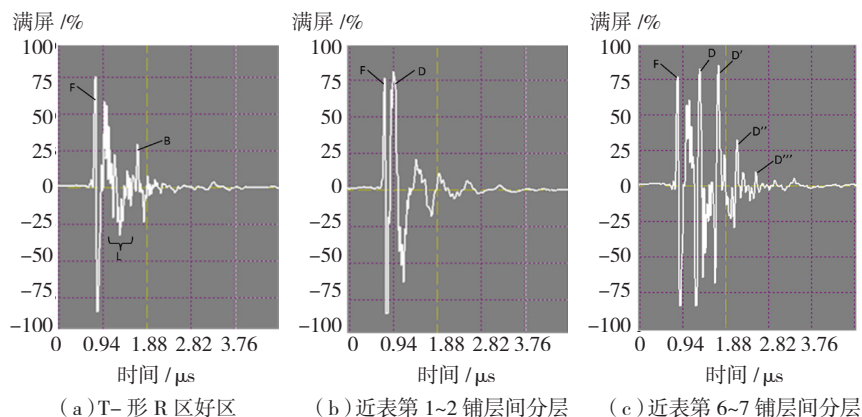


图3 T-形R区好区和缺陷区超声回波信号及其特征

Fig.3 Echo signal reflected from T-shape R-zone without defect and with defect

B波或界面波,可以估算出F波与B波之间的时域刻度 $t_{FB} \approx 1.03 \mu s$,即近似对应声波在厚度为 h_1 的R区蒙皮中传播时间;(3)来自T-形R区蒙皮区层间的声波反射信号,如图中L所标示的脉冲信号波形,简称L波或层波,与复合材料及其铺层工艺有关。

与图3(a)中的超声检测结果相比,图3(b)中来自T-形R区近表面分层的超声检测结果明显的信号特征是:(1)入射声波在T-形R区蒙皮表面产生的反射信号——F波幅值和波形与图3(a)的F波几乎一致,表明换能器同样在T-形R区蒙皮表面获得了良好的声学耦合;(2)来自T-形R区蒙皮近表面1个铺层深度位置的分层的声波反射信号,如图3(b)中D所标示的脉冲信号波形,简称D波;(3)由于D波的叠加效应,使原来L波位置出现了明显不同于图3(a)中L波特征,此时,原来图3(a)中的B波也随之消失;(4)尽管D波非常靠近F波,但时域上仍然清晰可辨。

图3(c)对应R区中第6~7个铺层之间(即位于R区蒙皮1/2深度位置) $\phi 6mm$ 分层的典型超声A-显示回波信号及其特征,可以清晰地看出:(1)来自T-形R区蒙皮表面的F波;(2)来自T-形R分层的D波以及D波的二次(D')、三次(D'')和四次(D''')反射波,从F波与D波的时域位置,可以估算出分层对应的时间刻度 $t_{FD} \approx 0.47 \mu s$,据此,可以近似判断分层的实际深度 $h_D \approx \frac{t_{FD}}{t_{FB}} h \approx 0.46h \approx 0.5h$,与实际预置的分层位置(R区蒙皮1/2深度位置)相一致;(3)位于F波和D波之间的L波。

因此,基于图3中的超声信号及其特征变化,利用B波动、D波及其多次反射可以非常容易进行R区缺陷的判别,即使是位于碳纤维复合材

料层压结构中T-形R区蒙皮近表面1个铺层深(约0.13mm)的分层,也可以非常清晰地对其进行识别和检出;利用F波与B波、F波与D波之间的时域特性,可以帮助确定分层所在的深度位置。

图4是来自实际碳纤维复合材料层压结构中T-形R区中对应位置 P_2 右侧R区部位的典型超声A-显示回波信号及其特征,R区蒙皮由12个碳纤维复合材料预浸料铺层构成,采用FCC-D-1复合材料超声检测仪,比较图4与图3(c)可以非常清晰地看出:来自T-形R区对应位置 P_2 右侧R区部位超声A-显示回波信号具有相似的特征,即出现了F波、L波和D波及D波的二次波(D')、三次波(D''),尽管L波和D波的时域细节有所不同,但其反射规律高度一致:D波的相位与F波相反、会产生明显的D波及其多次反射波,同时B波消失。据此,可以非常清晰地确定在R区存在分层。根据图4中F波与D波之间的时域刻度,可以估算出检出分层对应的时间刻度 $t_{FD} \approx 0.47 \mu s$,据此,可以近似判断分层的实际深度 $h_D \approx \frac{t_{FD}}{t_{FB}} h \approx 0.92h$,据此可估测检出分层的铺层深度约为11个铺层,即检出分层约位于R区

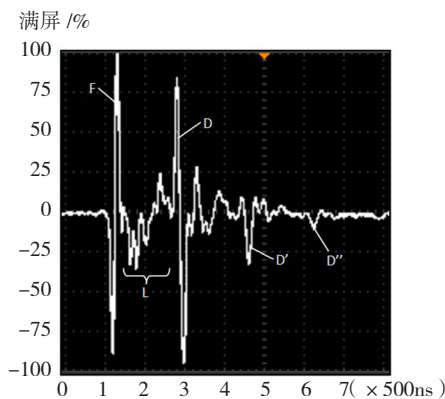


图4 实际复合材料结构中T-形R区分层的超声回波信号及其特征
Fig.4 Typical echo signal from T-shape R-zone in a real composite structure with delamination

蒙皮的第11~12个铺层界面之间。

针对上述检测结果,对经超声检出分层部位对应的R区位置进行了取样解剖分析,图5是对检出分层部位断面进行金相观察后得到的光学显微结果。图5中P所指示的白色箭头对应声波入射方向,F所指示的白色箭头对应界波反射位置,D所指示的黑色箭头对应缺陷波反射位置。可以非常清晰地看出,在R区存在分层,如图5中黑色箭头指向的黑色虚线部位所示,而且分层的实际深度也是位于第11~12个铺层界面之间,与图4中的超声检测结果和分层深度的估测结果完全相一致。

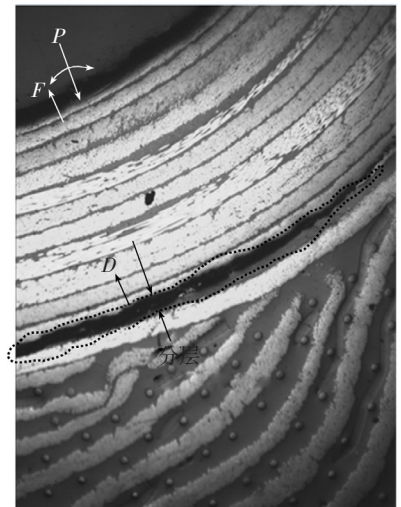


图5 超声检出分层的解剖验证结果
Fig.5 Destructive testing result of the found out delamination in T-shape R-zone

结论

(1)针对复合材料结构中R区的结合特点和检测要求,通过选择不同的入射位置和入射方向,采用专门的R区超声检测系统及换能器,可以有效地实现复合材料结构中R区的超声检测;

(2)采用水膜耦合方法,可以获得非常稳定的超声检测信号,并且超声检测与验证结果表明,来自R区层间界面的反射信号与来自R区缺陷的反射信号在时域上有明显不同的特征,据此可以进行R区缺陷判

别和确切定位检出缺陷的铺层深度位置;

(3) 系列超声检测试验表明, 采用宽带窄脉冲超声反射法可以有效地检出复合材料结构中 R 区中不同深度的分层缺陷, 其表面检测盲区可达到单个复合材料预浸料铺层厚度 (约 0.13mm);

(4) 实际超声检出结果与解剖验证结果取得了良好的一致性, 所建立的复合材料 R 区超声检测方法已经得到了系列的实际检测应用, 取得了较好的工程检测应用效果。

参考文献

- [1] 汪洋. 复合材料在大型民用飞机中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(3): 11-15.
- WANG Ping. The application of composites in civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2008(3): 11-15.
- [2] 刘松平, 刘菲菲, 郭恩明, 等. 复合材料结构数字化自动化无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2008(15): 43-46.
- LIU Songping, LIU Feifei, GUO Enming, et al. Digitized and automated nondestructive testing for composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(15): 43-46.
- [3] CHANG J, ZHENG C, NI Q Q. The ultrasonic wave propagation in composite material and its characteristic evaluation[J]. Composite Structures, 2006, 75(1): 451-456.
- [4] BURKE S K, COUSLAND S M, SCALA C M. Nondestructive characterization of advanced composite materials[J]. Metals Forum, 1994, 18: 85-109.
- [5] HEIDA J H, PLATENKAMP D J, HEIDA J H, et al. Evaluation of nondestructive inspection method for composite aerospace structures[C]//6th NDT in Progress 2011, International Workshop of NDT Experts, Prague, 2011.
- [6] BOSSI R H. NDE developments for composite structures[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820(1): 965-971.
- [7] 刘菲菲, 刘松平, 郭恩明. 复合材料层压结构冲击损伤超声成像评估[J]. 无损检测, 2014, 36(11): 2-5.
- LIU Feifei, LIU Songping, GUO Enming. Ultrasonic imaging evaluation of impact damages in composite laminates[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(11): 2-5.
- [8] DJORDJEVIC B B. Ultrasonic nondestructive testing of large-scale composites[J]. Materials Evaluation, 2014, 72(7): 922-927.
- [9] MINEO C, PIERCE S G, WRIGHT B, et al. PAUT inspection of complex shape composite materials through six DOFs robotic manipulators[J]. Insight, 2015, 57(3): 161-166.
- [10] 王柄方, 韩赞东, 原可义, 等. 复合材料喷水超声检测工艺[J]. 无损检测, 2010, 32(8): 616-619.
- WANG Bingfang, HAN Zandong, YUAN Keyi, et al. Research on water-squirting ultrasonic testing parameters for composite materials[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(8): 616-619.
- [11] SYSTEMS T S. Inspection of complex composite aerospace structures using automated 3D ultrasonic scanning[J]. CINDE Journal, 2012, 33(1): 12.
- [12] 刘松平, 刘菲菲, 孟秋杰, 等. 用于检测复合材料 R 区的超声探头: 201210054308.5[P]. 2012-03-02.
- LIU Songping, LIU Feifei, MENG Qiujie, et al. An ultrasonic transducer for R-zone in composite structures: 201210054308.5[P]. 2012-03-02.
- [13] 刘松平, 白金鹏, 刘菲菲, 等. 一种检测复合材料整体结构内腔的探头及超声扫查方法: 2012101955528.X[P]. 2013-12-04.
- LIU Songping, BAI Jinpeng, LIU Feifei, et al. An ultrasonic transducer and scanning method for inner stringers in composite integrated structures: 2012101955528.X[P]. 2013-12-04.
- [14] 刘松平, 刘菲菲, 白金鹏, 等. 一种数字便携式复合材料超声检测仪器: 201320021135.7[P]. 2013-01-15.
- LIU Songping, LIU Feifei, BAI Jinpeng, et al. A portable digital ultrasonic instrument for composites: 201320021135.7[P]. 2013-01-15.
- [15] 刘松平, 郭恩明, 刘菲菲, 等. 一种工业级的超声自动扫描成像检测设备: 201110199057.5[P]. 2011-07-18.
- LIU Songping, GUO Enmin, LIU Feifei, et al. An industrial automated scanning ultrasonic imaging inspection system: 201110199057.5[P]. 2011-07-18.

通讯作者: 刘松平, 理学博士, 研究员, 主要研究方向为复合材料及焊接无损检测与评估, E-mail: liusping2014@163.com。

Ultrasonic Evaluation and Defect Discrimination of T-Shape R-Zone in Composite Structures

LIU Feifei, LIU Songping, FU Tianhang, LI Legang, BAI Jinpeng
(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Currently, the nondestructive testing and evaluation (NDT & E) of R-zone in carbon fiber-reinforced composite structures (CFRCS) has become a focus in the area. A high-resolution ultrasonic technique was employed for the NDT & E of T-shape R-zone in CFRCS based on the reflected echo signals and their characterizations by studying the interaction of incident short-pulse ultrasonic wave with T-shape R-zone. Series of ultrasonic testing and destructive testing experiments were carried out. A water-film couple method was used between transducer and T-shape R-zone surface. The incident direction and position of wave beam can be changed through the scanning of transducer and its aided mechanical device for 100% NDT of T-shape R-zone. Series of experimental and practical results have shown that the ultrasonic tech-

nique is very powerful in the NDT & E of T-shape R-zone in CFRCS. Defects and their exact positions in layup direction can be effectively discriminated and quantitatively determined according to the time-resolved reflected echoes from T-shape R-zone laminates and their time-domain characterization. The surface resolution and dead-zone of the ultrasonic method can be reached to 0.13mm, i.e., the thickness of a single prepreg ply approximately. The series of destructive testing results have excellently demonstrated the correction of ultrasonic results compared with the real defect induced during the manufacturing of the CFRCS with T-shape R-zones.

Keywords: Ultrasonic evaluation; Composite; T-shape R-zone; Defect discrimination

(责编 大漠)

(上接第37页)

[2] 郎波,侯金保,滕俊飞,等. 新型航空材料及其结构的扩散焊[J]. 航空制造技术, 2014(20): 74-75.

LANG Bo, HOU Jinbao, TENG Junfei, et al. Diffusion welding of new aviation material and structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(20): 74-75.

[3] 王向民,乔宦文. 钛合金 SPF/DB 技术在航空工业中的应用[J]. 钛工业进展, 1998(1): 8-11.

WANG Xiangmin, QIAO Huanwen. Application of titanium alloy SPF/DB technology in aero-industry[J]. Titanium Industry Progress, 1998(1): 8-11.

[4] 陶京新,卢超,刘松平. 薄板焊缝中超声 TOFD 检测方法浅析[J]. 航空制造技术, 2014(20): 87-90.

TAO Jingxin, LU Chao, LIU Songping. Review of ultrasonic TOFD method for thin welds[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(20): 87-90.

[5] 刘松平,郭恩明. 扩散焊连接构件

微缺陷高频超声检测技术[J]. 航空制造工程, 1993(5): 38-40.

LIU Songping, GUO Enming. High frequency ultrasonic technique for micro-defects in SPF/DB components[J]. Aeronautical Manufacturing Engineering, 1993(5): 38-40.

[6] 刘松平,郭恩明,谢凯文,等. 钛合金扩散焊中紧贴型缺陷的超声波检测[J]. 无损检测, 2004(2): 62-65.

LIU Songping, GUO Enming, XIE Kaiwen, et al. Evaluation of kiss defect in diffusion welding of titanium alloy by ultrasonic pulse-echoes[J]. Nondestructive Testing, 2004(2): 62-65.

[7] MATSON D M, LANSAW J T, SUITS M W. Ultrasonic inspection of diffusion bonded platelet rocket chamber liner[J]. Materials Evaluation, 1993, 51(5): 545-551.

[8] KAPRANOS P, PRIESTNER R. NDE of diffusion bonds[J]. Metal and Materials, 1987, 3(4): 194-198.

[9] WEGLEIN R D. Titanium diffusion bond evaluation via acoustic microscopy[J]. IEEE

Ultrasonics Symposium, 1988, 2:1045-1048.

[10] 刘松平,郭恩明. KG CJ-1 扩散连接高频超声检测仪[J]. 航空制造技术, 1994(5): 19-20.

LIU Songping, GUO Enming. KG CJ-1 high frequency tester for SPF / DB components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1994(5):19-20.

[11] EDWILL E R, ALBERTO R, WALED H, et al. Nonlinear ultrasonic NDE of titanium diffusion bonds[J]. Nondestruct Eval, 2014(33): 187-195.

[12] 刘松平,李乐钢,刘菲菲. 一种基于自动扫描的非线性超声成像检测方法: 201310646365.7[P].2013-05-06.

LIU Songping, LI Legang, LIU Feifei. A nonlinear ultrasonic imaging detection method based on automatic scanning: 201310646365.7[P]. 2013-05-06.

通讯作者: 刘松平, Email: liusp2014@163.com.

Evaluation of Thick Diffusion Bonds by Using NLU Imaging Method

LIU Songping, LI Legang, LIU Feifei, SHI Junwei
(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Diffusion bonding (DB), as a solid state welding, has been increasingly applied in aeronautical and space industries. The defects induced in thick DB plate are much more difficult to be found out by conventional ultrasonic techniques because of their characteristics of kiss-bonding, small-size and distribution and high ultrasonic attenuation. A new ultrasonic imaging technique, which is based on non-linear ultrasonic (NLU) components of the received signals resulted from diffusion bonding interface, is developed into nondestructive evaluation (NDE) of thick diffusion bonded plate. The experimental results show the powerful ability to the NDE of thick plate diffusion bonds by using the NLU visual method. The maximum thickness of diffusion bonding is up to 70mm.

Keywords: Ultrasonic evaluation; Diffusion bonding; Non-linear ultrasonic; Ultrasonic imaging

(责编 大漠)