

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.03.08

碳纤维-铝多层结构胶接质量的超声检测

徐浪¹, 潘勤学², 王超¹, 顾军¹, 伍建雄¹, 刘金峰¹

(1. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 采用宽带窄脉冲超声换能器对树脂基碳纤维与铝板胶接质量进行检测, 通过对采集的回波信号幅值、声时以及相位等因素的分析, 找出回波信号与胶接缺陷形态的对应关系, 提出针对树脂基碳纤维与铝多层结构胶接结构的超声检测方法。本文还通过对试块上预埋缺陷的检测确定了该检测方法的准确性, 并运用红外热成像检测技术对检测结果的可靠性予以验证。

关键词: 树脂基碳纤维; 铝; 胶接质量; 超声检测

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2015) 03-0033-03

Bonding Test of Carbon Fibers by Ultrasonic

XU Lang¹, PAN Qinxue², WANG Chao¹, GU Jun¹, WU Jianxiong¹, LIU Jinfeng¹

(1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China; 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 China)

Abstract: An ultrasonic method was proposed in this paper to evaluate the bonding quality of resin carbon fibers and aluminum by analyzing the corresponding relation between the bonding defects and the amplitude, propagation time, and phase of the echo. The accuracy and reliability of the relation was verified through the testing of multi-layer specimens with embedded defects.

Key words: resin carbon fibers; aluminum; bonding quality; ultrasonic

0 引言

树脂基碳纤维是由环氧树脂基体与碳纤维增强体组成的一种复合材料, 其具有较高的比强度^[1]和比模量^[1]以及良好的抗疲劳性和成型工艺性, 目前广泛应用于航空航天制造领域, 并在很多关键部位替代了金属材料, 而碳纤维与金属的胶接结构更是大量应用在各种型号产品的研制和生产中, 胶接质量的好坏直接影响了产品的可靠性和使用寿命。

目前, 多层结构胶接质量检测应用较多的有红外热成像检测法和敲击法, 但检测灵敏度较低, 检测精度较差, 对于多层结构无法判定缺陷发生的界面位置, 而且红外热成像作为无损检测新技术, 检测成本高。本文基于脉冲反射法^[2]提出了对于这种典型结构的超声评估, 同时, 也降低检测成本。

1 检测原理

针对碳纤维与铝板多层胶接结构的特点, 采用接

触式脉冲反射法进行胶接质量检测。超声纵波在传播过程中遇到声阻抗不同的材料时, 在界面处会发生不同程度的反射。通过采集界面回波和底面回波信号, 分析纵波传播的声时、相位以及幅值变化, 从而判定缺陷的存在。

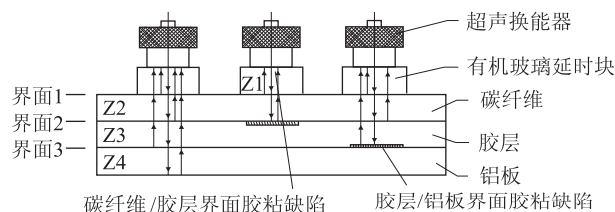


图1 超声检测原理

由于工程实际中胶接结构厚度均较薄(碳纤维材料厚度约 1 mm, 胶层厚度 1 ~ 2 mm, 铝板厚度约 1.5 mm), 为使回波信号不被触发信号淹没, 故检测过程中采用一定厚度的有机玻璃延时块进行波形延时, 如图 1 所示。

超声纵波的传播特性可知, 当纵波从介质 I 入射到介质 II 中, 在两种介质交界面上声压反射率^[3]和透射率^[3]分别由式(1)和式(2)得到。

收稿日期: 2015-03-03; 修回日期: 2015-04-15

作者简介: 徐浪(1987-), 男, 湖北黄冈人, 助理工程师, 硕士, 主要从事复合材料检测方面的研究。

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_{II} - Z_I}{Z_{II} + Z_I} \quad (1)$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_{II}}{Z_{II} + Z_I} \quad (2)$$

式中： p_r 为反射波声压； p_t 为透射波声压； p_0 为入射波声压； Z_I 为介质 I 的声阻抗； Z_{II} 为介质 II 的声阻抗。

如图 1 所示，胶接良好时，入射纵波在界面 1、界面 2、界面 3 均发生不同程度的反射和透射，以及在铝板的底面发生全反射；第一层材料脱粘时（图中 7），入射纵波在界面 1 发生反射与透射，在界面 2 发生全反射；第二层材料脱粘时（图中 6），入射纵波在界面 1、界面 2 均发生透射和反射，在界面 3 发生全反射。

由式(1)、式(2)及表 1 中的参数可知：在胶接良好情况下，界面 1 的反射波与入射波相位相同，界面 2 的反射波与入射波相位相反，界面 3 的反射波与入射波相位相同，铝板底面反射波与入射波相位相反；第一层材料脱粘情况下，界面 1 的反射波与入射波相位相同，界面 2 的反射波与入射波相位相反；第二层材料脱粘情况下，界面 1 的反射波与入射波相位相同，界面 2 的反射波与入射波相位相反，界面 3 的反射波与入射波相位也相反。

因此，可根据采集界面反射回波的波形组成以及各成分波形的相位关系判断缺陷形态。

表 1 材料参数

材料	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	纵波声速 /($m \cdot s^{-1}$)	声阻抗 /($g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)
有机玻璃	1.29	2700	348300
碳纤维	1.76	3000	528000
胶层	1.40	2530	354200
铝板	2.70	6370	1720000

由于检测对象较薄，与常规超声检测法不同的是：

①本文研究采用宽带窄脉冲换能器，并引入延时技术将反射回波与始脉冲分离；②常规超声仅通过回波幅值来判定缺陷，本文结合幅值和相位的方法，通过分析回波成分幅值和相位的关系，不仅能够判定缺陷的存在，还能分析出脱粘缺陷出现的界面位置。

2 检测结果及分析

宽带窄脉冲系列超声换能器，中心频率为 5 MHz，晶片尺寸 6 mm。根据实际被检测工件的制作工艺，设计如图 2 所示的试块，试块规格：200 mm × 200 mm，各层材料厚度与实际工件相同，在铝板侧分别加工直

径为 20, 15, 10, 6, 3 mm 规格的平底孔，左边两列平底孔模拟第一层材料脱粘，右边三列平底孔模拟第二层材料脱粘。

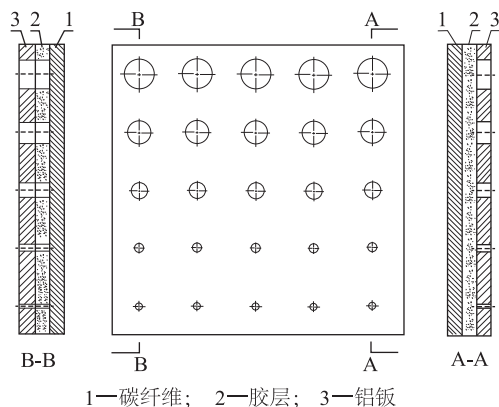
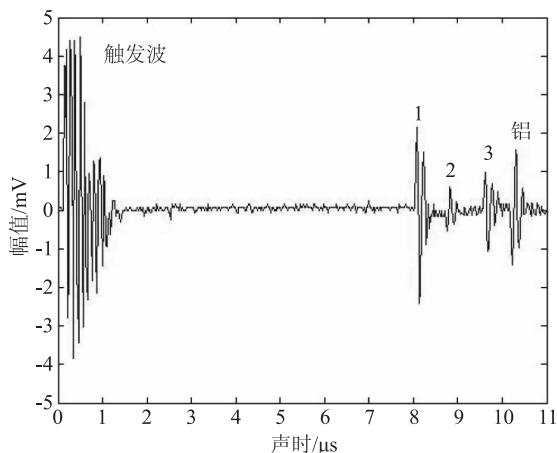


图 2 对比试块

2.1 脱粘缺陷存在性判定

超声纵波换能器在胶接良好区域和脱粘模拟缺陷区域的回波信号如图 3 所示，图中“1”表示界面 1 回波，“2”表示界面 2 回波，“3”表示界面 3 回波，“铝”表示铝板的底面回波，从图中可以看出：胶接良好时，界面 1、界面 2、界面 3 和铝板底面均有反射回波，且界面 1、界面 3 的反射回波与触发波相位相同，界面 2 和铝板底面反射回波相位与触发波相反；第一层材料脱粘时，只有界面 1 和界面 2 处有反射回波，且界面 1 反射回波相位与触发波相同，界面 2 反射回波相位与触发波相反；第二层材料脱粘时，界面 1、界面 2、界面 3 均有反射回波，且界面 1 反射回波与触发波相位相同，界面 2 和界面 3 反射回波相位与触发波相反。实际检测回波信号与理论分析一致，因此，可以通过回波信号的组成和相位关系进行脱粘缺陷存在的有效判定。



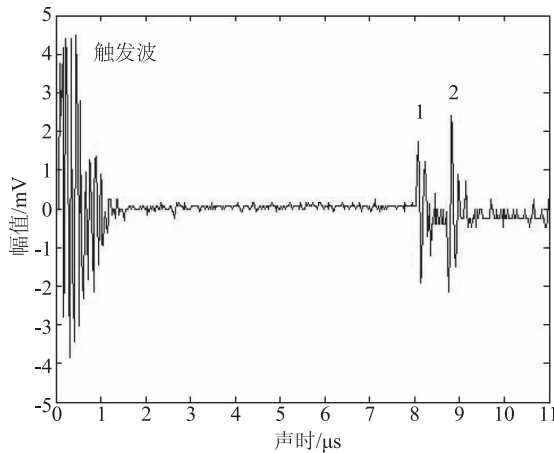
(a) 胶接良好回波信号

预埋缺陷的检测平均值与理论值见表2,对比可以看出采用6 dB法能够有效的进行大于晶片尺寸的脱粘缺陷检测。

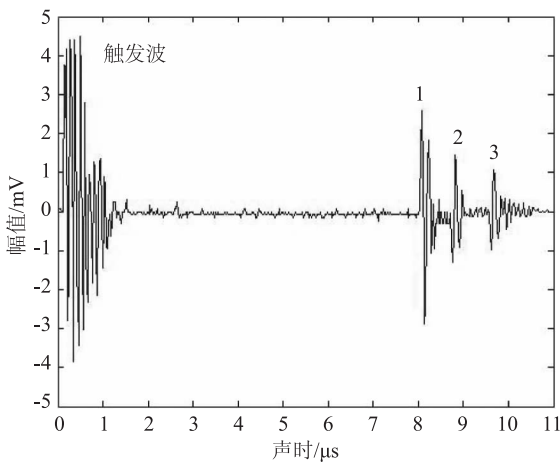
理论尺寸(直径)	检测平均尺寸(直径)	mm
20	19.3	
15	14.2	
10	10.4	
6	6.2	

2.3 对比验证

由于制造工艺的原因,实际被检测工件90%以上的脱粘缺陷发生在第一层材料与胶层交界面处,为进一步验证检测方法的可靠性,采用红外热成像法进行对比。图5(a)为超声检测结果,图5(b)为对应位置的红外热成像检测结果,从图中可以看出超声检测结果与红外热成像检测结果基本上都能吻合,以此验证了超声检测结果的可靠性。



(b) 第一层材料脱粘回波信号



(c) 第二层材料脱粘回波信号

图3 检测回波信号

2.2 脱粘缺陷大小确定

实际检测过程中仅仅对脱粘缺陷进行定性分析是远远不够的,还需对缺陷的大小进行描述,从而为缺陷定级提供参考。对于不小于超声换能器晶片尺寸的缺陷,采用6 dB法^[4]进行检测,而对于小于超声换能器晶片尺寸的缺陷,采用标准试块对比法。图4为采用6 dB法对制作试块的检测结果,图中标“1”的位置为第一层材料脱粘缺陷,其余为第二层材料脱粘缺陷。

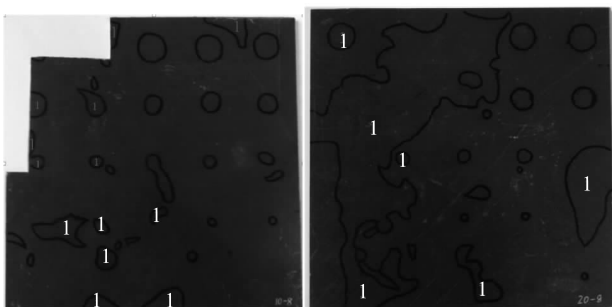
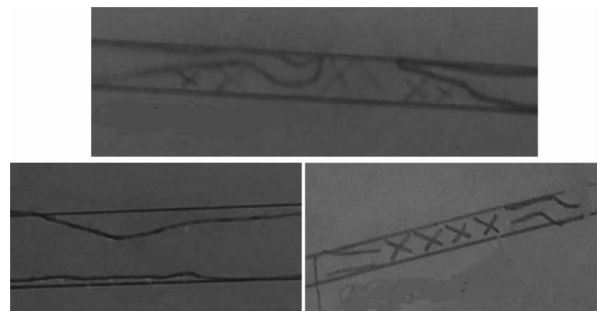
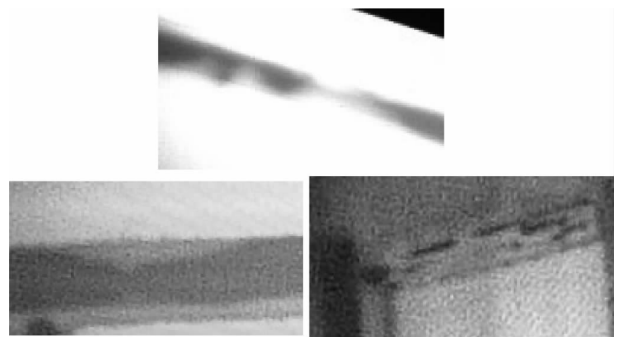


图4 试块检测结果



(a) 超声检测结果



(b) 红外热成像检测结果

图5 超声检测与红外热成像检测结果对比

3 结论

针对碳纤维较薄且与铝板粘接的多层结构特点,提出基于脉冲反射的超声检测方法,采用宽带窄脉冲超声换能器对脱粘缺陷进行检测,分析回波信号的组

(下转第69页)

表2 灰熔融性测定仪控温性能实验结果

控温误差 /°C	温度波动 范围/°C	升温速度/(°C·min ⁻¹)		恒温带 /mm
		900°C以下	900°C以上	
-2.4~3.0	1.6~4.7	16.5~18.7	4.4~5.2	34~40

表3 灰熔融性测定仪测量性能实验结果

灰熔融性特征温度	重复性误差/°C	示值误差/°C
变形温度 DT	21~32	15~22
软化温度 ST	11~18	15~24
半球温度 HT	12~20	17~28
流动温度 FT	12~22	19~29

4.2 测量性能的校准

4.2.1 测量重复性校准

选取两种不同的煤灰熔融性标准物质，在弱还原性气氛下分别对每个煤样进行7次灰熔融性重复测量（测量次数越多，实验标准差的不确定度越小，实验标准差越小^[7]。参考相同类型类似原理的煤中全硫测定仪检定规程中的经验值，试验中进行7次重复性测量^[8]），记录每次测量的四个特征温度，分别按式(1)计算重复测量标准差 s 。有

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中： n 为重复测量次数 ($n=7$)； X_i 为第 i 次测量煤样的特征温度值； \bar{X} 为 n 次重复测量结果的平均值。

4.2.2 示值误差校准

选取三种不同的煤灰熔融性标准物质，在弱还原性气氛下分别对每个煤样灰熔融性重复测量2次（示值误差的评定方法要求，在规定的条件下，对被评定的测量仪器进行一定次数的测量或比较^[7]。参考相同类型类似原理的煤中全硫测定仪检定规程中的经验值，试验中进行2次测量^[8]），记录每次测量的四个特征温度，分别以2次测量结果的平均值作为该煤样的特征温度值。按式(2)计算煤灰熔融性标准物质测量值与标准值之差，即为仪器的示值误差 Δ 。即

$$\Delta = T - T_0 \quad (2)$$

式中： T 为标准物质的测量值； T_0 为标准物质的标准值。

3台灰熔融性测定仪的测量重复性和示值误差结果见表3，结果均符合技术指标的要求。

5 结论

灰熔融性测定仪的内部结构、工作原理有其特殊性，目前尚缺少可依据的检定规程或校准规范等技术性文件，简单的温度测试无法全面体现仪器性能指标，影响了仪器特征参数的溯源性和仪器的准确性。本文根据灰熔融性的结构组成和工作原理，分别对控温性能、测量性能等性能指标开展计量校准研究，提出了相应的校准方法，并开展了相关实验。通过实际操作表明，该校准方法可操作性强，切实可行，能较好地反映仪器的计量性能。

参 考 文 献

- [1] 杨爱红. 煤灰成分对灰熔融性影响研究[J]. 科技与企业, 2013(15): 324.
- [2] 丁宏刚, 熊友辉. 基于图像识别技术的自动灰熔点测试仪研制[J]. 实验技术与管理, 2005(1): 72-75.
- [3] 朱茜, 丁峰元, 冯帅博. 工业分析仪计量性能校准方法的研究[J]. 计量技术, 2012(6): 47-50.
- [4] 国家发展和改革委员会. MT/T 941-2005 灰熔融性测定仪通用技术条件[S]. 北京: [出版者不详], 2005.
- [5] 陈宝华. 煤灰熔融性测试中封碳法控制试验气氛研究[J]. 煤质技术, 2010(7): 8-10.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 219-2008 煤灰熔融性的测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1094-2002 测量仪器特性评定[S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 1006-2005 煤中全硫测定仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.

(上接第35页)

成以及各成分幅值、相位间的关系，从而判断缺陷脱粘缺陷出现的位置，并采用6dB法确定脱粘缺陷的边界，通过红外热成像技术对超声检测结果进行验证，充分说明了超声法进行碳纤维-铝多层结构胶接质量评估的可行性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 刘松平, 刘菲菲. 复合材料无损检测技术一瞥[J]. 无损检

测, 2008(30): 117-123.

- [2] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [3] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 林猷文, 何双起. 超声检测——国防科技工业无损检测人员Ⅱ级培训教材[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.