

复合材料粘接结构超声声谐振检测技术

陈颖 何双起

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 分析了超声声谐振检测技术原理,采用该技术对编织石英/酚醛树脂复合材料粘接结构进行了检测技术研究。结果表明:采用所建立的超声声谐振检测装置,对于厚度为 7 和 9 mm 编织石英/酚醛树脂复合材料粘接结构可分别实现 $\Phi 10$ 和 $\Phi 15$ mm 以上的脱粘缺陷检测。

关键词 超声,谐振,检测,粘接,复合材料

Ultrasonic Resonant Inspection of Composite Bond Structures

Chen Ying He Shuangqi

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The ultrasonic resonant NDT technique was analytically discussed and the inspection technology of composite bond structures was studied with the developed ultrasonic resonant equipment, the result suggests that the de-bond defects more than $\Phi 10$ mm in the bond structures for the composite layer of 7 mm thick, and the de-bond defects more than $\Phi 15$ mm in the bond structures for the composite layer of 9 mm thick can be found out.

Key words Ultrasonic, Resonant, Inspection, Bond, Composite

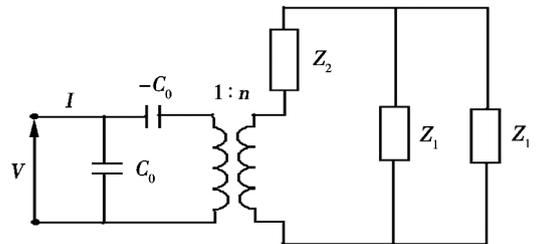
0 引言

目前复合材料粘接结构的检测主要采用声学(包括脉冲超声反射、脉冲超声穿透、声阻、声谐振、超声导波以及敲击等)、光学(包括激光全息照相和错位散斑成像)以及红外热波成像等方法。编织石英/酚醛树脂复合材料内部气孔含量高、纤维方向复杂、厚度较大,具有较大的声衰减和较高的声色散特征,因此当粘接结构特点只允许在复合材料一侧进行检测时,超声反射和穿透、超声导波、光学以及红外热波等检测技术方法难以得到应用。与声阻检测技术相比,超声声谐振检测技术具有更高的检测灵敏度,目前在飞机碳纤维或者玻璃纤维复合材料层压板粘接结构的质量检测中已获得应用^[1-5]。本文主要介绍了超声声谐振检测技术原理和编织石英/酚醛树脂复合材料粘接结构的超声声谐振检测技术方法。

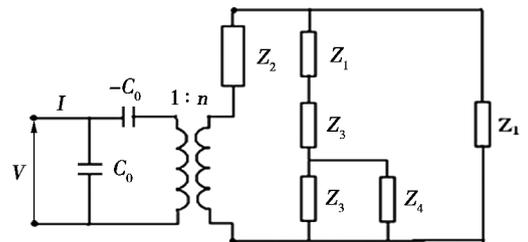
1 超声声谐振检测技术原理

超声声谐振检测技术是通过超声换能器激发超声波并传输至被检测构件,测量以被检测构件为负载的超声换能器的阻抗特性,根据阻抗特性进行被检构件质量评定。图 1 为换能器自由振动、有负载和负载

有缺陷时的等效机电网络图。可以看出,负载和缺陷的存在,只是改变自由振动换能器等效机电网络中一条并联支路的阻抗,其网络的基本构架没有改变。图 2 为换能器有负载时的简化机电网络和等效电路。



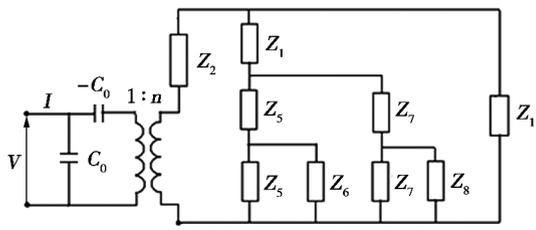
(a) 换能器自由振动



(b) 换能器有负载

收稿日期:2010-12-15

作者简介:陈颖,1972 年出生,博士,高级工程师,主要从事无损检测技术研究。E-mail:ndt_center_case@126.com

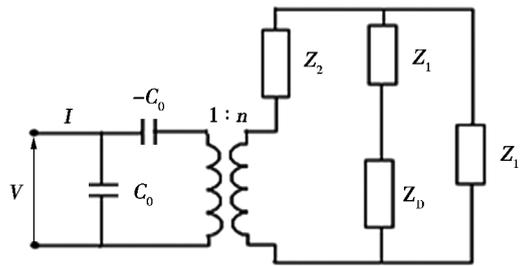


(c) 换能器负载有缺陷

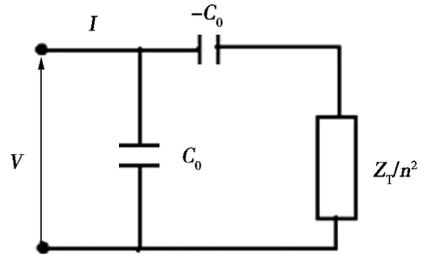
图1 等效机电网络图

Fig.1 Electrical equivalent circuit of transducer

的改变量,将极大地提高检测灵敏度。



(a) 简化机电网络



(b) 等效电路

图2 简化机电网络和等效电路

Fig.2 Simplified electric equivalent circuit

图2中的阻抗 Z_T 为简化机电网络中的总机械阻抗,由图容易得出:

$$Z_T = Z_2 + \frac{Z_1(Z_1 + Z_D)}{2Z_1 + Z_D} = Z_T = Z_2 + \frac{Z_1}{2} \frac{1 + \frac{Z_D}{Z_1}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_D}{Z_1}} \quad (1)$$

式(1)表明,负载的存在对等效机械阻抗的改变通过 Z_D/Z_1 得到了体现。在一般情形下,等效电阻抗的改变量很小,只有当 $Z_D \gg Z_1$ 时, Z_D 等效机械阻抗才会产生大的变化, $Z_D \gg Z_1$ 的条件可以通过采用接近负载谐振频率,并且偏离换能器机械谐振频率(反谐振频率)的工作频率而实现。此外,等效机械阻抗的改变量与等效机械阻抗自身的量值相比,在一般情形下,也是很小的,因此,把测量阻抗量值改为测量阻抗

设被测材料中含和不含缺陷时导致等效机电网络中并臂中增加的机械阻抗分别为 Z_{DQ} 和 Z_{DF} ,则当负载含和不含缺陷时换能器等效电阻抗的改变量 Z_{EC} 为:

$$Z_{EC} = \frac{h_{33}^2}{\omega^2} \cdot \frac{Z_{TF} - Z_{TQ}}{Z_{TF}Z_{TQ}} = \frac{h_{33}^2}{\omega^2} \cdot \frac{1}{Z_1} \cdot \left[\frac{\frac{Z_{DQ}}{Z_1} - \frac{Z_{DF}}{Z_1}}{\left[\left(1 + 2 \frac{Z_2}{Z_1}\right) + \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_{DF}}{Z_1} \right] \left[\left(1 + 2 \frac{Z_2}{Z_1}\right) + \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_{DQ}}{Z_1} \right]} \right] \quad (2)$$

从式(2)可看出,等效电阻抗的改变量 Z_{EC} 与负载的机械阻抗差值($Z_{DQ} - Z_{DF}$)成正比,且它与换能器串并臂等效机械阻抗的比值 Z_2/Z_1 有关。设换能器工作频率为 f ,换能器反谐振频率为 f_a ,则:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = - \frac{1}{2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_a}\right)} \quad (3)$$

式(3)在 $f=f_a$ 时达到最小,表明以频率 $f=f_a$ 工作时比较有利于检测。

2 试验研究及结果

2.1 检测频率的确定

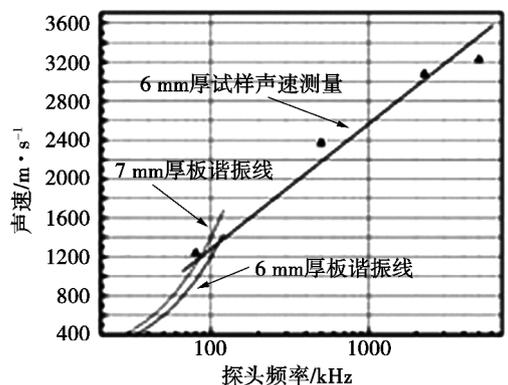
将两种厚度(7和9 mm)的多维编织RTM成型复合材料加工成板状试样(为了避免表面平整度对测试结果的影响,7 mm厚试样加工成6 mm厚)。

采用超声穿透法对上述两种试样测试声速,根据超声声谐振原理,实现超声声谐振检测时,换能器工作频率(f)、材料声速(v)及复合材料板厚度(d)之间应满足式(4)的关系:

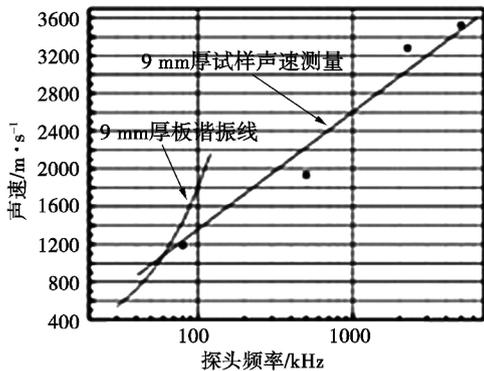
$$v = 2d \times f \quad (4)$$

根据声速测试数据绘制的频率-声速曲线与根据式(4)绘制的曲线(复合材料板谐振线)的交点对应的频率即是复合材料板的谐振基频。

图3为6和9 mm厚试样的测试结果和计算分析图,结果表明:7 mm厚空气舵隔热层复合材料板的谐振基频约为80 kHz,9 mm厚空气舵隔热层复合材料板的谐振基频约为60 kHz。



(a) 6 mm厚试样



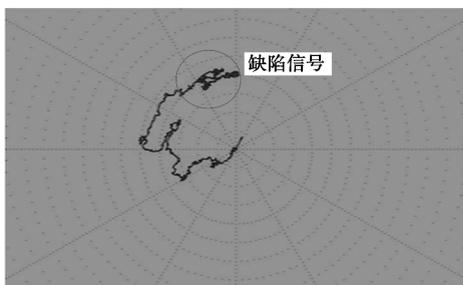
(b) 9 mm 厚试样

图 3 测试结果和计算分析图

Fig. 3 Test and analysis pattern

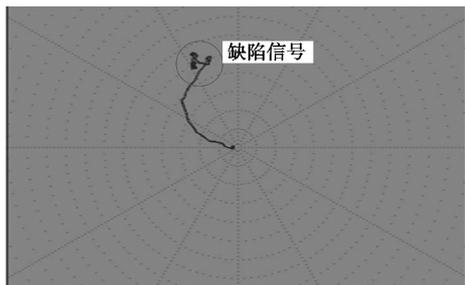
2.2 试样检测

根据确定的检测频率,研制了相应的检测电路和探头,搭建了超声声谐振检测装置,在人工模拟脱粘缺陷试样上进行了检测试验(图4)。



(a) 复合材料层厚度 7 mm

(探头从非缺陷区移向 $\Phi 10$ mm 模拟脱粘缺陷)



(b) 复合材料层厚度 9 mm

(探头从非缺陷区移向 $\Phi 15$ mm 模拟脱粘缺陷)

图 4 超声声谐振检测试验结果

Fig. 4 Ultrasonic resonant test pattern

为确保检测结果的可靠性,利用对其他方式制作的试样进行了检测试验(图5),图中白色线标出的区域为检测中判定的脱粘缺陷区域。通过解剖观察(图6),表明上述脱粘缺陷区域的判定是正确的。



图 5 用于检测结果验证的试样及检测结果

Fig. 5 Sample plate and test result

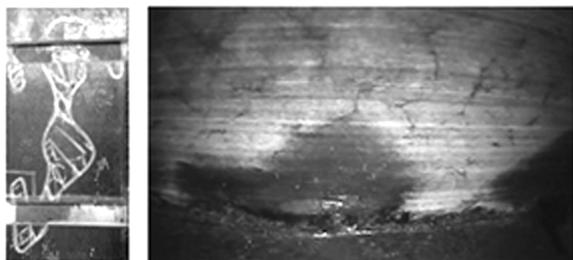


图 6 检测结果解剖验证

Fig. 6 Test result validating

3 结论

(1)根据超声声谐振检测原理分析和材料声速测量与计算,确定了厚度为 7 和 9 mm 编织石英/酚醛树脂复合材料粘接结构检测所需检测工作频率分别为 80 和 60 kHz。

(2)检测试验研究表明,采用所建立的超声声谐振检测装置,对于厚度为 7 和 9 mm 编织石英/酚醛树脂复合材料粘接结构可分别实现 $\Phi 10$ 和 $\Phi 15$ mm 以上的脱粘缺陷检测。

参考文献

- [1] Guyott C C H, Cavely P, Adams R D. The non-destructive testing of adhesively bond structure; A Review[J]. Journal of Adhesion, 1986, 20(2): 129-159
- [2] Guyott C C H. The non-destructive testing of adhesively bond structures[D]. London: the University of London, 1986
- [3] Munns Ian. Adhesive bond inspection using nondestructive testing[J]. Materials World, 1995, 3(11): 527-529
- [4] Addison R C, Yang Q D, Rugg K L, et al. NDE of composite bonded doublers [C]//International SAMPE Technical Conference, 2001, 33: 1-11
- [5] Stepinski T, Jonsson M. Narrowband ultrasonic spectroscopy for NDE of layered structures[J]. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2005, 47(4): 220-224

(编辑 吴坚)