

声振检测方法的发展

邬冠华¹,林俊明²,任吉林¹,周昌智²

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063;
 2. 北京中研国辰测控技术有限公司,北京 100191)

摘要:依据激励方式的不同,分别从敲击检测和声阻检测方法两个方面对声振检测方法进行了介绍。敲击检测方法主要分整体振动检测法(或车轮敲击法)和局部振动检测法(或硬币敲击法),声阻检测法主要分机械阻抗法和局部共振检测法。声振检测方法尽管很早以前就已经出现了,但至今主要还停留在经验性的应用层面。对各种声振检测方法的基本原理及其发展作简要论述,希望起到抛砖引玉的作用,吸引业界关注该方法发展和应用的同仁共同来推进它的技术进步。

关键词:声振检测;敲击检测;机械振动检测;声阻法;谐振法

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2011)02-0035-07

Evolution of the Acoustic Impact Testing Method

WU Guan-Hua¹, LIN Jun-Ming², REN Ji-Lin¹, ZHOU Chang-Zhi²

(1. Key Laboratory of NDT, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
 2. Beijing Echo Special Technology of NDT Co Ltd, Beijing 100191, China)

Abstract: The acoustic impact testing method is presented with two different excitation methods: the tap testing method and the acoustic impedance testing method. The tap testing method includes the whole vibration testing (wheel-tap test) method and the local vibration testing method(coin-tap test), and the acoustic impedance method has the mechanical impedance method and the local resonance testing method. Though the acoustic impact testing method has a long history in testing activities, most concerns of this method are only restricted in its experiential applications. Here, the principals and their developments of several branches of the acoustic impact testing method are covered, with the main purpose to improve this old but effective method with the help of the people who concern its development and applications.

Keywords: Acoustic impact testing; Vibration testing; Mechanical vibration testing; Acoustic impedance method; Resonance method

声振检测方法是一种通过激励被检试件,使其产生机械振动(声波),并从机械振动的测定结果中判定被检测对象质量的方法。它的特点是简便、快速、低廉。敲击检测方法就是其中最简单常用的一种。依靠构件振动特性实施无损检测技术,按照测量方法大致可分为四类^[1-2]:利用整体模态检测原理实施单点激励,单点测量结构的整体响应;利用局

部阻抗检测原理,对欲检测部分逐点激励,测量激励点的局部响应;利用振动模态检测原理,多点激振并在所选的几点上测量整体响应;利用振动引起的缺陷部位表面位移或热效应原理,单点激振并在结构上方对其局部响应作多次或多处测量。以下主要从激励方式角度出发,将声振检测方法分为敲击振动检测以及声阻抗检测,并着重对各种声振检测方法的基本原理进行介绍。

1 敲击检测

敲击检测是最古老的声振检测方法之一。依据

收稿日期:2010-02-08

基金项目:无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助项目
 (ZD200929010)

作者简介:邬冠华(1963—),男,教授。

被检测对象的振动方式不同,又可以分为整体振动和局部振动;依据信号采集方法的不同,又可以分为声音检测以及应力检测。

1.1 整体敲击检测法

整体敲击检测法又被称为车轮敲击检测法(Wheel-tap test)^[3-5],是最普遍、易于实施、成本最为低廉的无损检测方法之一。古代的人们就已经学会用这种方法来判断陶器、瓷器等物品中是否存在裂纹等。其主要原理是:当物件中存在较大缺陷(如裂纹、夹杂和空隙等)时,人耳所听到的由敲击产生的声音会比较沉闷,否则声音清脆。以铁路工人用小锤检测车轮的完整性为例,操作者首先用小锤敲击车轮中的一点或多点,然后从听到的声音中判定车轮中是否存在缺陷;当然,现代的铁路敲击检测中,还要求探伤工人结合敲击的手感并配合目视检测,对结果进行判断。这里,敲击的过程就是在被检测对象中激励产生机械振动的过程;而声音以及敲击手感的获取则是检测过程中的信息采集;检测人员凭借自己的经验对获得的信息进行分析判断,得到的最终结论就属于检测过程中的特征提取及结果判断。这种以人工敲击被检测件产生振动,并用耳所听到的声音作为判断被检测对象中是否存在缺陷的方法的优劣性非常明显,其优点是方便、快捷、易于实现且成本低廉;缺点是严重依赖于操作人员的敲击和主观判断,易造成误判和漏判。

尽管如此,人们依然为提高这一方法的准确性和易用性而努力着。这部分工作主要是基于对构件振动的模态分析展开^[2]。振动检测方法的核心思想是:当被检测对象中存在某种缺陷时,结构整体的某些振动特征也会随之改变。然而,该方法一直未得到很好的实际应用的原因,恰恰在于这种振动特性分析的困难性。对于一个形状规则、材质均匀的对象而言,这种分析可能不会花费太多的时间,但当被检测对象的结构稍微复杂时,相应的分析则要复杂得多。

模态分析的初期依然是对振动持续时间的分析,与前人工作不同的地方在于,得益于电子技术和计算机技术的发展,人们可以很方便地记录模式振动持续的时间、幅值等信息。通过与已知结构的振动时间、幅值大小甚至振动衰减率的比较而获知被检测对象中是否存在缺陷^[1-2]。其后,人们将注意力转移到对振动模态所对应的自然频率等参量上。对于任何结构而言,总会存在一个或多个自然频率。

这些自然频率的变化基本遵循如下表达式所表示的规律^[1]:

$$\Delta f_i \approx \delta EI \frac{\partial f_i}{\partial EI} + \delta m \frac{\partial f_i}{\partial m} + \delta K_s \frac{\partial f_i}{\partial K_s} + \delta \rho I \frac{\partial f_i}{\partial \rho I} \quad (1)$$

也就是说,影响构件自然频率的主要因素包括:构件的弯曲刚度 EI (E 为杨氏模量, EI 为截面的二次矩),构件的单位长度质量 m ,剪切刚度 K_s 以及旋转惯量 ρI (ρ 为材料密度)。这些参量的细微变化所引起的频率变化是近线性的。当构件局部存在缺陷,以及尺寸或材料的差异时,相应的参数 EI, m, K_s 以及 ρI 会产生变化,从而引起频率的变化。此外,各个局部缺陷所引起的频率变化是可以叠加的,因此这种方法还可以对多重缺陷引起的综合频率变化进行评估。各国轮机行业中普遍使用的“叶片测频检测技术”,以及球墨铸铁件强度的无损测定均是基于这种谐振振动检测方法^[6]。

以构件正常(无损伤)的模态特性为检测依据对构件实施模态分析时,如果整批构件的容差很小,使用整体敲击检测方法便可获得很好的检测效果。当检测需求较高时,则要求被检测对象的尺寸公差非常小,因此,这种方法常用于检测那些设计安全系数较大的工件。运用整体振动检测方法时,通常是在构件的一段轻敲,而从另一端的加速度传感器中获取振动信息,辅以计算机等设备用 FFT 方法获取其频率响应,并与预知的特征频率点进行比较后得到检测结果。为了克服操作人员敲击方式对检测结果判断的影响,提高敲击检测的可靠性,可以采取以微处理器控制机械敲击工具来敲击被检工件,并以传感器(常用加速度计)拾取应力的变化或声调变化的方法来改进整体敲击检测法。

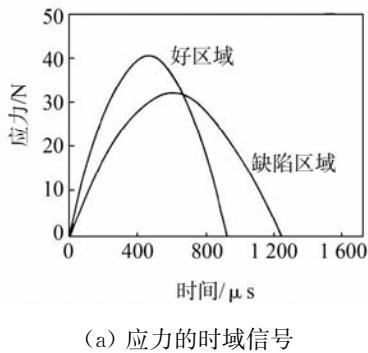
1.2 局部敲击检测法

局部敲击检测法又被称为硬币敲击检测(Coin-tap test)或改锥把手检测(Screwdriver-handle test)^[1]。这种检测方法通常需要操作者使用小锤、改锥把手或硬币等质量较轻的物体,对被检测对象进行逐点检测。与整体敲击检测方法不同的是:由于结构材料的非刚性,所发出的声音不是整体结构的响应,而是敲击表面下局部结构的响应,因此这种方法所得到的冲击响应与被检测对象的局部机械阻抗和弹性系数有关。局部敲击检测方法是胶接结构和复合材料结构检测中常用的一种检测方法。

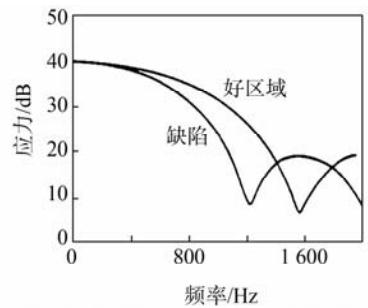
早期的局部敲击检测方法是由操作人员用一元硬币或银元等对复合材料进行轻叩,通过耳朵听取声音的不同来进行判断。如果被检测对象中存在缺

陷,则发出的声音沉闷。当这种方法用于航空航天领域的复合材料检测时,人们则制定了敲击锤的标准,并用电子技术来取代传统的人耳信号的采集与判断。

局部敲击检测方法的理论和应用工作主要是由英国帝国理工的 Cawley 教授与 Bristol 大学的 Adams 教授奠定。1988 年,Cawley 等人在声阻法和低速冲击方法的基础上对硬币敲击检测方法的原理,理论模型以及判定标准进行了细致的研究^[7]。他们的研究对象为复合碳纤维面板的蜂窝结构复合材料,选择的判断信号为敲击时所产生的应力信号,而非一般人耳听到的音频信号。当复合材料中存在分层等缺陷时,所对应的应力信号在时域和频域上将有如图 1 所示的显著区别。



(a) 应力的时域信号



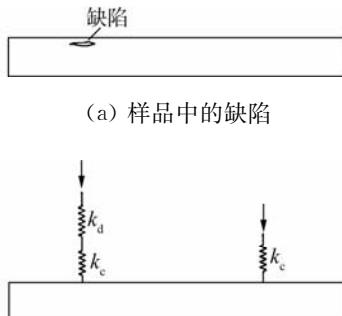
(b) 应力的频域信号

图 1 有无缺陷时的敲击检测信号对比

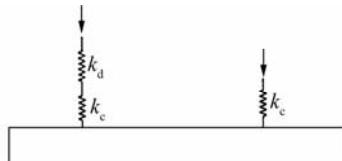
从图 1 中不难看出,当被检测样品中存在缺陷时,其对应的应力持续时间会较长,而相应的频率则要低一些。

对这种情况下所得到的敲击信号,Cawley 等所选用的模型为简化的弹簧模型,即当被检测对象中存在缺陷时,它相当于在完好的结构中串联了一个因缺陷所引起的弹簧,如图 2 所示。图中 k_d 是缺陷对应的弹性系数; k_c 是敲击时锤头与结构的接触系数。

假设锤头的质量为 m ,撞击时的速度为 v ,弹性



(a) 样品中的缺陷



(b) 敲击检测所对应的弹簧模型

图 2 弹簧模型

系数为 k ,则撞击的持续时间 τ 可由下式给出:

$$\tau = \frac{\pi}{\omega} \quad (2)$$

式中 $\omega = (k/m)^{1/2}$ 。弹簧中的力 F 则表示为:

$$F = \frac{kv}{\omega} \sin \omega t \quad 0 \leqslant t \leqslant \omega \quad (3)$$

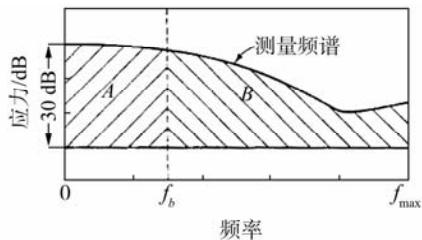
而在敲击后,锤头会立即以速度 v 反弹,因此根据牛顿定律可得:

$$\int_0^\tau F dt = 2mv \quad (4)$$

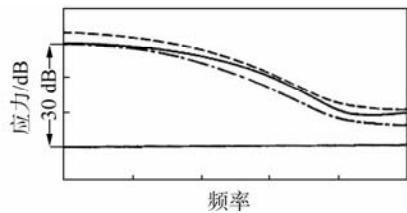
由于局部敲击检测方法仅仅对被检测样件的局部进行检查,要完成对一整个构件的扫查,就必须对其进行逐点扫查。从上面的分析也可以看出,构件局部的完好与否,可以从应力信号的持续时间以及频率中比较得出。Cawley 等人在理论分析的基础上,提出一种基于频谱的新的评定标准。这种方法与传统的受力峰值、作用力持续时间甚至频谱在中心频率附近的下降速率等进行比较的方法相比,具有更高的可信度。因为,作用力峰值受锤击速度等的影响,有时难以分辨无缺陷和有缺陷的情形;利用作用力持续时间进行比较的方法虽然实用,但在噪声较大时所得到的作用力持续时间就变得非常不准确;而频谱曲线斜率判定的方法可以分辨一些弹性系数较小的缺陷,对于弹性系数大一些的缺陷,其频谱曲线斜率与无缺陷时非常相近,很难分辨。从简单实用的角度出发,引入参量 R 作为唯一的评判依据:

$$R = \frac{B}{A + B} \quad (5)$$

式中的 A 和 B 分别表示归一化的应力信号频谱中的左右两部分面积,如图 3 所示。图中 A 和 B 的分界线 $f = f_b$ 是一条由用户自己所确定的分界线,通常选择的 $k = f_b/f_{max}$ 在 30%~50% 之间。这种方法建立在应力信号高频部分存在差异性的基础之



(a) 标准样件测试图谱中的面积 A 和 B



(b) 用于比较判断的归一化频谱图

图 3 标准样件测试图谱

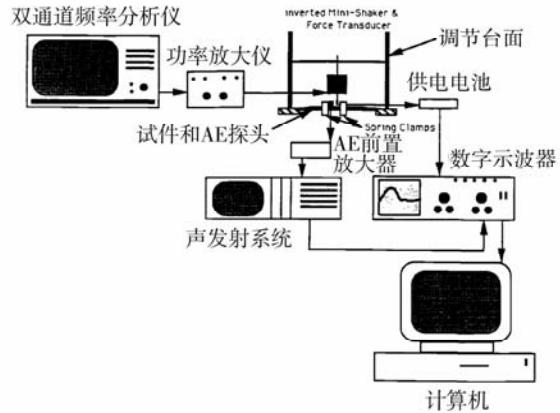
上:当被检测物体中没有缺陷时,其高频部分的幅值相对要大;而当被检测物体中存在缺陷时,相应地,其高频部分幅值就小一些。

在这一理论基础上,Cawley 等人进行了大量的工作^[7-9],对不同劲度系数(即不同深度和不同大小)的缺陷分别进行敲击检测,并对获得的应力信号进行频谱分析,然后分别计算相应的 R 值后与标准 R 进行比较。结果表明这种方法对一些较大或较浅的缺陷可以很好地分辨出来,但对于较小或较深的缺陷而言,则难以判别。

这种方法只是选用敲击时所产生的应力信号,而未对声音信号予以接收和处理。这项技术的鼻祖是英国的 Rolls Royce Mateval 公司,典型产品为 Tapometer^[10];后来 WichiTech 公司推出 RD3^[11-12](波音公司所支持)和日本 Mitsui 公司(现更名为 Bittech)推出的 Woodpecker^[13](空客公司倡导)也基本是基于敲击检测中应力相应时间这一参量进行评价。只不过,Mitsui 公司的专利^[14]表明,Woodpecker 的锤击部分还加入了加速度传感器,最新版本的仪器还加入了频谱分析判断功能。

其他研究人员也进行了一些局部敲击检测方面的工作^[15-19],其中以奥本大学 P K Raju 等人所倡导的 Acoustic Impact Technique(AIT)为主。与 Cawley 等人不同的是,他们引入了声发射探头用于对局部声振信号的检测。所用的试验装置如图 4 所示^[15]。

该装置用一个脉冲信号来驱动一个迷你小锤以实现复合材料表面的局部振动;位于迷你小锤头部

图 4 AIT 方法的试验装置^[15]

的应力传感器用以拾取敲击产生的应力变化情况。试验时,小锤的锤击速度设置为每秒钟 3 次。试验对象为一半完好,一半分层的石墨/环氧分层复合材料以及三种不同状态的石墨/酚醛树脂复合材料(完好、纤维错位、纤维断裂)。当进行检测时,图 4 中的装置作整体移动,以实现对复合材料的不同的点进行检测。试验结果表明,利用 Cawley 等人的应力持续时间判断方法可以分辨出复合材料中的分层缺陷;而引入的声发射换能器则可以区分出复合材料中的错位和断裂等缺陷。

21 世纪初,人们迎来了又一次声振检测的研究热潮。卡梅隆大学的 Wu Huadong 等人就设计了一种试验方案,分别采集小锤锤击所产生的加速度信号、音频信号以及在复合材料表面所产生的应力信号,并用计算机对这些信号进行简单处理^[20]。他们认为如果依照 Cawley 所提出的 $1/3$ 分布功率谱方法来判断敲击方法所产生的应力信号或声音信号,是无法得知这两种信号中的何种更优于敲击检测,但他们同时认为,相比于敲击得到的声信号或应力信号而言,这种 $1/3$ 分布功率谱的判别方法更有利自由振动的情形;另外,他们也认为材料内的缺陷距离表面较浅或内部结构复杂时,单纯的弹簧模型将不再适用。爱荷华州立大学 Peters 等人则在 RD3 的基础上,发展了一种用于波音飞机复合材料快速检测和扫描的成像系统 CATT^[21]。这种方法的判断依据依然是被检测材料因敲击而反作用于锤子的反作用力持续时间:当被检对象完好时,持续时间较短;反之,反作用力的时间将加长;从本质上而言,这种方法与 RD3 的做法其实是一致的,并没有本质上的不同。2003 年,印度的 Srivatsan 等人对复合材料敲击的数据进行声音采集,并运用神经网络方法进行处理,获得了一定的效果^[22]。他们的工

作基本是在实验室样品上完成的,即所有的训练样本以及测试样本都是同一种复合材料,并没有将该模型应用到更为广泛的样本中予以测试,同时也未找到他们后续的研究工作。

在国内,也有部分学者对这种检测方法进行过研究。哈工大工业大学的冷劲松等人就在 20 世纪 90 年代中运用 Cawley 等人的方法对配橡胶内侧复合材料板壳进行敲击检测^[23],从应力的时域信号以及频域信号中分辨出不同层的脱粘缺陷;随后又从弹簧模型角度出发,计算出敲击检测方法用于 GFPR 复合材料检测时的最小灵敏度^[24]。2007 年,南京航空航天大学的闫晓东^[25]在其硕士论文中描述了一种运用敲击检测方法对飞机复合材料结构检测的智能敲击系统,其工作侧重于硬件平台的构建,并未对敲击检测方法进行过多的研究。

除航空航天领域的复合材料外,建筑物/体也是局部振动检测方法的一个重要应用领域^[26]。值得一提的是,也有人将这一方法用于医疗领域以判断胎儿的肺发育是否完好^[27]。

2 声阻法检测法

声阻法检测又称为机械阻抗法检测,是声振检测方法中的一种。它把反映材料振动特性的力学阻抗转换为换能器的负载阻抗。由于材料的力学阻抗与材料结构存在着一定的关系,因此通过对换能器特性的测量来判断材料力学阻抗的变化,从而达到检测的目的。点源激发被检测材料使被检测材料作弯曲振动的声阻法一般用来检测粘接质量,如薄蒙皮粘接和蜂窝结构粘接质量等(如图 5 所示)^[1]。根据对换能器测量参量的不同,可分为振幅法、相位法和频率法。从检测信号工作频率的不同,声阻检测方法又可以分为常规声阻检测法与声谐振检测法。

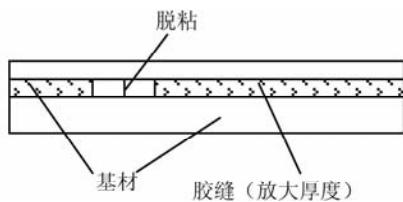


图 5 声阻法检测的典型缺陷示意图

声阻法检测开创于前苏联,是由前苏联科学家 Ю В Ланге 于 1959 年提出的,又被称为机械阻抗分析,包括单晶声阻法和双晶声阻法^[28-29]。其中,单晶声阻法通常指用单个换能器激发样品作纵振动,并通过测量换能器谐振时的幅值而完成检测。双晶

声阻法较为常用。这种方法用一个尖端点接触的双晶探头,通过探头内部的辐射杆及底部的触头将探头顶端晶片所激励的声波信号传导入被测件内部,被测件中传回的声波信号被置于探头底部的晶片所接收。由于被测件与探头接触作为其振动负载(力阻抗),被测件中粘接状况的变化将会引起接收信号幅值和相位的变化。与电阻抗包含电容和电感相似,机械阻抗也包含质量和柔顺性。测量通常是在 1~10 kHz 范围内的单一振动频率下进行。

常规声阻检测法的弹簧模型与硬币敲击检测(Coin-tap testing)方法基本一致,如图 2 所示,因为两者都属于局部振动检测方法。但与硬币敲击检测中产生自由振动不同的是,声阻抗检测中产生的多为强制振动,其主动性相对多一些。其相应的检测设备包括俄罗斯早期的 UD-94D,以及国内所生产的 SZY-I, II, III, AFD-1000 声缺陷指示仪等。常规声阻检测法选用的换能器由发射压电晶片,接收压电晶片组成,施加于发射晶片的信号为正弦驱动信号。当换能器在自由空间未与被检测件接触时,接收晶片和发射晶片的刚性连接使得它们的运动保持一致,接收晶片上无应变存在,因此没有信号输出;当换能器垂直放置于被检测件表面实施检测时,换能器的触头与被检测件干耦合,接收晶片的下表面受阻,形成应变,从而产生输入。其受阻阻抗的大小由结构件被测点的局部劲度系数和质量决定。利用专门的仪器接收并显示接收晶片所得到的信号幅值及相位信息,从而判断被检测件的该点是否存在缺陷。

声谐振检测法与常规声阻抗检测法类似,即通过电声换能器激励被检测物体,并测量因被检测对象参量的不同而引起的阻抗变化量。其大致又可以分为两类:以单一频率声波入射被检测件的单频谐振检测法和以频率随着时间变化的声波入射被检测件的扫频谐振检测法。

单频谐振检测法选用的数学模型如图 6 所示,用具有阻尼的弹簧质量系统单自由度结构模型来模拟叠层复合材料结构或蒙皮与芯粘接结构。

对一个脱粘或分层不连续的结构而言(粘接强度为 0),脱粘或分层以上的材料可以看作是周围被钳定的膜。当此区域被激励时,可以认为它是以膜的第一模态进行谐振,相应的第一模态谐振频率为:

$$f_r = \frac{0.47h}{r^2} \frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \quad (6)$$

式中 h 为不连续处距离上表面的深度; r 为不连续

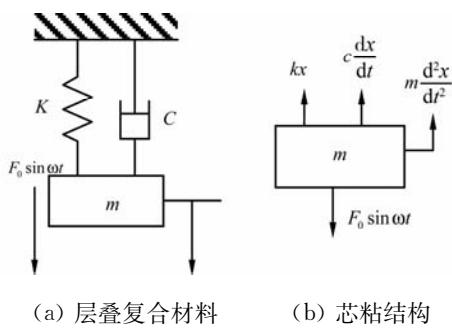


图 6 不同结构的弹簧质量系统单自由度结构模型

的半径; E 为不连续上方材料的杨氏模量; ρ 为不连续上方材料的密度; σ 为不连续上方材料的泊松比。大量实践均已证明, 利用这一原理制成的机械阻抗测试技术(即声阻仪)可以容易地测定直径为深度 10 倍的不连续(脱粘、分层与气孔), 特别适合于薄蒙皮结构。

脱粘或分层以上的材料部分, 其声阻抗可以表示为 $Z = \rho v \tanh[\alpha + j(\beta + kt)]$, 其中 α 是反射常数; β 为相位变化; k 为波数; t 是厚度。在粘接工件中, 脱粘引起的等效厚度的变化将明显改变换能器谐振频率信号的相位与幅度。在多层复合材料中相位与脱粘深度相关。因此通过对完好粘接信号调零, 相应的脱粘信号的幅值和相位在极坐标中位置的不同将可以直观地显示出胶结结构的粘接状况, 且脱粘信号的端点随着脱粘深度的增加从右侧开始作反时针方向运动^[1]。

扫频谐振检测法所选用的激励声波为频率随时间变化的连续声波。当被检测件的自然频率及谐振频率与激励信号的频率相符时, 换能器所承受的载荷相比于其他频率成分时要重得多, 从而易于检测到因为载荷变化而引起的信号电流变化。利用这种方法可以可靠地检测出板材的厚度, 胶接结构和复合材料构件中的脱粘、分层、气孔等缺陷的位置和深度。利用这种方法形成的典型仪器主要有福克(Fokker)仪和 BondMaster 胶结检测仪。

声阻抗检测技术^[30~33]常用于航空航天产品胶接结构和复合材料结构粘接质量的检测。在检测时, 探头与被检测件表面之间不需要加液体耦合剂, 尤其适用于那些难以维持超声检测耦合剂的现场检测, 以及某些薄蒙皮蜂窝结构件的检测, 避免了蒙皮透水的可能性。

3 小结

从激励方式角度出发, 将声振检测方法分为敲

击振动检测以及声阻抗检测, 并对各种声振检测方法基本原理作了简略介绍。由以上描述可见, 尽管声振检测方法早就被人们应用到实际生产生活中, 但对其中的振动检测机理等许多问题未曾做过深入的研究。例如: 在声振检测方法中, 人们更多地关注着应力持续时间这一参量, 或者是所产生的声音的音频特性, 但这两者之间的联系却未见报道。随着电子技术以及现代信号处理技术的飞速发展, 以复合材料为具体研究对象, 对声振检测方法作进一步深入研究, 将先进的电子技术引入这一古老的检测手段中, 势必会给这一古老的检测手段注入崭新的生命活力。基于此, 分别从理论和实验着手, 深入研究声振检测方法, 分析敲击所产生的信号与缺陷之间的对应关系, 建立一种可靠的缺陷判别模型, 研制出一种易于操作, 方便快捷, 结果可靠的复合材料声振检测系统, 将会进一步推进声振检测技术的实际应用。

参考文献:

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 294~351.
- [2] Doebling S, Farrar C, Prime M. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91~105.
- [3] Adams R. Vibration measurements in nondestructive testing[C]. The 3rd International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Thessaloniki, Greece; 2003: 27~35.
- [4] Adams R D, Cawley P. Vibration techniques in non-destructive testing[C]. Research Techniques in Non-Destructive Testing, Vol. 8, London: Academic Press, 1985: 303~360.
- [5] Cawley P. Defect Location in Structures by a Vibration Technique[D]. Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London, 1978.
- [6] 仲维畅. 声振动无损检测材料强度的方法及其检测机理[J]. 材料工程, 1992(3): 37~40.
- [7] Cawley P, Adams R D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing [J]. Journal of Sound Vibration, 1988, 122: 299~316.
- [8] Cawley P, Adams R D. Sensitivity of the coin-tap method of nondestructive testing[J]. Materials Evaluation, 1989(47): 558~563.
- [9] Cawley P. Low frequency NDT techniques for the detection of disbonds and delaminations[J]. British Journal of Non-Destructive Testing, 1990(32): 454~461.

- [10] Marsh G. Finding flaws in composites [J]. Reinforced Plastics, 2002, 46(12): 42—46.
- [11] <http://www.wichitech.com/rd3taptammer.html>
- [12] Georgeson G, Lea S, Hansen J. Electronic tap hammer for composite damage assessment [J]. Non-destructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware, SPIE, 1996, 2945: 3—5.
- [13] <http://www.wp632.com/productwp632.html>
- [14] Kunihiro Mitsuhashi, Chihiro Jyomuta, Fujio Oka, et al. Method and Apparatus for Impact-type inspection of Structures: United States, 05048320[P]. 1991—09—17.
- [15] Raju P, Patel J, Vaidya U. Characterization of defects in graphite fiber based composite structures using the Acoustic Impact Technique (AIT) [J]. Journal of Testing Evaluation, 1993(21): 377—395.
- [16] Haque A, Raju P K. Acoustic Impact Technique in Identifying Fatigue Damage in Composite Materials [J]. Materials Evaluation, 1998, 56(6): 765—770.
- [17] Murthy C R L, LM Hegde, KM Ravindra, et al. Microprocessor Based Instrumentation for Acoustic Impact Testing [C]. // PK Raju. Proceedings, 89-WA/NDE-6, ASME Winter Annual Meeting. New York, 1989.
- [18] Norwood C, Wood L. The Use of Vibration Techniques in Non Destructive Testing [C]. // The Institution of Engineers Australia Vibration and Noise Conference. Melbourne: Institution of Engineers, Australia; 1990: 270—275.
- [19] White C, Whittingham B, Li H, et al. Vibration based structural health monitoring of adhesively bonded composite scarf repairs [C]. // the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007. Brisbane, Australia: Engineers Australia; 2007: 198—203.
- [20] Wu H, Mel Siegel. Correlation of Accelerometer and Microphone Data in the “Coin Tap Test” [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(3): 493—497.
- [21] Peters J J, Barnard D J, Hudelson N A, et al. A prototype tap test imaging system: Initial field test results [J]. AIP Conference Proceedings, 2000, 509(1): 2053—2060.
- [22] Srivatsan V, Balasubramaniam K, Nair N V. Artificial Neural Network Based Algorithm for Acoustic Impact Based Nondestructive Process Monitoring of Composite Products [J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 657(1): 1651—1656.
- [23] 冷劲松,杜善义,顾震隆.配橡胶内衬复合材料板壳的敲击法无损检测[J].材料科学与工艺,1993,1(2):51—55.
- [24] 冷劲松,杜善义,王殿富,等.复合材料结构敲击法无损检测的灵敏度研究[J].复合材料学报,1995,12(4):99—105.
- [25] 闫晓东.飞机复合材料结构智能敲击检测系统研究[D].南京航空航天大学硕士论文,2007.
- [26] Sansalone M, Streett W B. Impact-echo NDE of Concrete and Masonry [M]. Ithaca, NY: Bullbrier Press, 2003.
- [27] Guidozzi F, Gobetz L. The tap-test a rapid bedside indicator of fetal lung maturity [J]. British Journal of Obstetrics and Gynaecology, 1991, 98: 479—481.
- [28] 李明轩.声阻法换能器特性的研究[J].物理,1972,1(2):79—88.
- [29] 李明轩.声阻法检测原理[M].北京:科学出版社,1976.
- [30] 陈积懋.声学综合无损检测技术[J].中国工程科学,2000,2(4):64—69.
- [31] 宁宁,袁慎芳,沈真,等.在役航空复合材料结构的无损检测技术[J].航空制造技术,2008,15:50—52.
- [32] Lange Y. The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing(a review) [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 1994, 11(4): 177—193.
- [33] Lalonde F, Rogers C. High-frequency impedance analysis for NDE of complex precision parts [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2717: 237—243.

摘要撰写

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地论述文献重要内容的短文,因此,必须符合拥有与论文同等的主要信息的原则。摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其它重要信息,内容不应空洞、过简,应具备四个要素,即研究目的、方法、结果和结论,其中,后两个是最重要的。中文摘要一般为200字左右,如需要可以略多;英文摘要内容应与中文摘要一致。