

蜂窝夹芯结构的无损检测技术

NDT Technology of Honeycomb Sandwich Structure

中国飞机强度研究所 曲亚林 宁 宁 詹绍正



曲亚林

助理工程师,主要从事飞机复合材料结构的无损检测工作及针对新型材料结构的无损检测方法研究。

复合材料由于其优异的性能而备受飞机设计者的青睐,已引起飞机设计及航空制造业的巨大变革,且这一变革正朝着继续加深的趋势发展^[1]。目前,航空飞行器上所用的复合材料结构主要有增强层板结构和夹芯结构两种,而在夹芯结构中以NOMEX蜂窝夹芯结构的应用最为广泛,它具有重量轻、比强度高、比刚度高、抗振、隔热、隔音、透波性能好等优点,因此在飞机的雷达罩、操纵舵面及客机的客舱地板等部位获得了大量应用。

78 航空制造技术·2011年第20期

NOMEX蜂窝复合材料中常见的缺陷有面板与芯材脱粘、面板分层、蜂窝芯内夹杂、蜂窝芯材褶皱、蜂窝芯节点开裂等。而对于这些缺陷,很难采用一种检测方法进行全面、有效的检测。因此,本文将针对NOMEX复合材料蜂窝结构中不同缺陷类型,开展各种无损检测方法比对分析的综合研究。

NOMEX蜂窝夹芯结构是由上下2层面板和中间蜂窝芯粘合而成(图1),蒙皮一般为玻璃纤维板或碳纤维薄板,芯材为NOMEX蜂窝,其网格形式通常为正六边形。因制造工艺不当或服役载荷作用下,NOMEX蜂窝复合材料容易形成缺陷,这些缺陷的存在威胁着复合材料蜂窝结构的安全,因此,对复合材料蜂窝结构的无损检测非常重要。

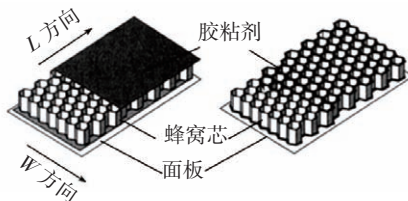


图1 蜂窝夹芯结构示意图

NOMEX 复合材料蜂窝夹芯结构的缺陷类型及无损检测方法分析

NOMEX蜂窝复合材料中常见的

缺陷有面板与芯材脱粘、面板分层、蜂窝芯内夹杂、蜂窝芯材褶皱、蜂窝芯节点开裂等。而对于这些缺陷,很难采用一种检测方法进行全面、有效的检测。因此,本文将针对NOMEX复合材料蜂窝结构中不同缺陷类型,开展各种无损检测方法比对分析的综合研究。

1 声学检测法

1.1 脉冲反射法

外场检测时通常结构不可拆卸,此时只能从单侧蒙皮对结构进行检测,脉冲反射法尤其适用于该种情况下的检测。

1.1.1 高频超声脉冲反射法

蜂窝夹芯结构蒙皮偏薄,对蒙皮自身的分层或蒙皮与蜂窝芯脱粘类缺陷,高频超声的检测效果较好。鉴于蜂窝夹芯结构的特点,高频超声只能穿透蒙皮,所以显示屏上只能看见单层蒙皮的面波与底波。蒙皮分层缺陷超声波形信号表现为蒙皮自身

底波消失,原面波与底波间出现明显缺陷回波。

对蒙皮与蜂窝芯脱粘类缺陷,要针对蜂窝格的尺寸选择合适声束直径的探头,通常声束直径要小于蜂窝格尺寸。在实际检测中,采用声束直径 1mm 的聚焦探头可以有效检出被检面的板芯脱粘。检测中,当超声声束入射至 A 区(图 2)的正上方,声波一部分被蜂窝芯吸收,继续向下传播,另一部分在蒙皮底部直接被反射,此时屏幕上可以看到蒙皮底部的反射回波;当超声声束入射至 B 区的正上方,声波到达蒙皮底部遇到空气层,直接反射回来,由于没有蜂窝芯对声波能量的吸收, B 区的反射回波要明显高于 A 区(图 3)。对于没有缺陷的结构,检测过程中,超声波形信号表现为底波波幅时高时低呈规律性跳动。检测时,设置合适的闸门高度,使 B 区底波超过闸门而 A 区底波低于闸门。如果材料无异常,此时检测过程中看到的报警指示灯忽明忽暗,呈规律性闪烁;如果材

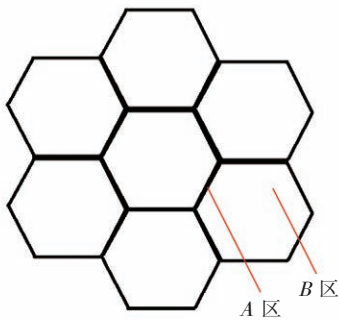
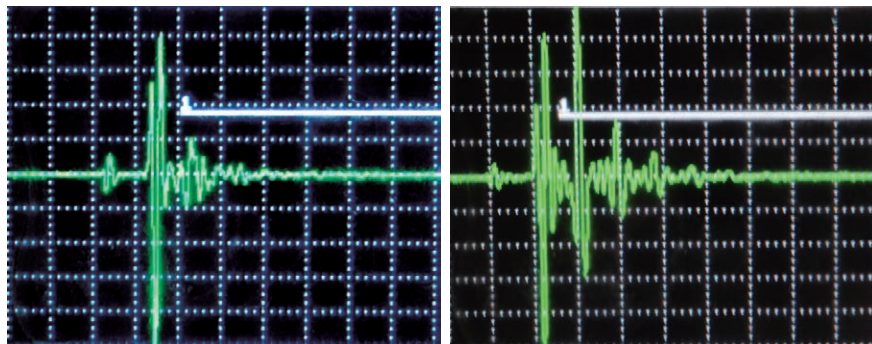


图2 A区、B区位置示意图



(a) A区波形信号

(b) B区波形信号

图3 蒙皮不同部位的高频超声信号

料出现脱粘缺陷,会出现报警指示灯长明现象,据此即可判断结构中的缺陷情况。但检测过程中应严格控制检测速度和扫查间距,避免缺陷的漏检。

超声 C 扫描检测蜂窝夹芯结构的检测结果比较直观。2MHz 阵列式聚焦探头能满足大部分结构的检测要求,但如果蒙皮厚度过厚,蜂窝格成像质量相对较差。对曲面结构,阵列式探头耦合不良,单晶片聚焦探头可很好的解决耦合问题(图 4)。

1.1.2 低频超声脉冲反射法

低频超声通常采用 1MHz 以下具有能量高、穿透力强的较大晶片直

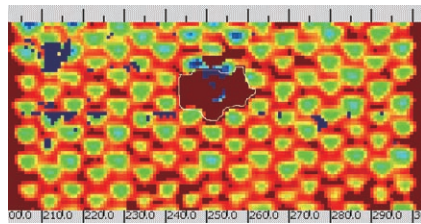
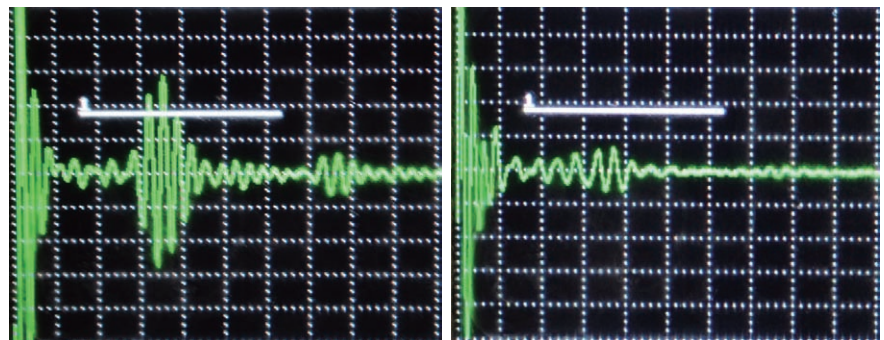


图4 阵列式聚焦探头检测结果



(a) 正常区域

(b) 缺陷区域

图5 正常区域与缺陷区域的低频超声信号比较

径的探头,它可以穿透结构全厚度,缺点是探头直径尺寸偏大、分辨力低、较小缺陷容易漏检。采用低频超声检测蜂窝夹芯结构时,蒙皮分层、脱粘、蜂窝芯塌陷等缺陷都会造成底波波幅突降或消失(见图 5),对缺陷的定性、定量存在一定难度。低频超声常用于对结构质量进行快速筛查,以发现结构中存在的较大尺寸的缺陷,检测速度较高。

1.2 脉冲穿透法

在结构生产过程中或结构可拆卸的情况下,脉冲穿透法是常用的检测方法。脉冲穿透法通常配合机械自动扫查系统,极大提高了扫查速度,节省了人力。工厂车间或大型实验室的机械自动扫查系统通常采用两个同步的机械臂带动探头同步移动,一侧探头发射声波,另一侧探头接收声波,探头与检测件之间采用水柱耦合,检测结果以 C 扫描形式显示出来,形象直观,见图 6。

1.3 发射-接收法(导波法)

常规的脉冲法是逐点对检测件进行检测,超声导波可以在材料中传播较远的距离,实现了线扫描检测,大大提高了检测效率。导波检测一般采用两个斜探头,发射探头以一定的角度发射超声波进入蜂窝结构。蒙皮一般比较薄,所以超声波一部分能量被蜂窝芯吸收,一部分能量在蒙皮内以漏兰姆波形态向前传播,接收探头与发射探头在同一直线上,接收蒙皮内的漏兰姆波能量。当出现

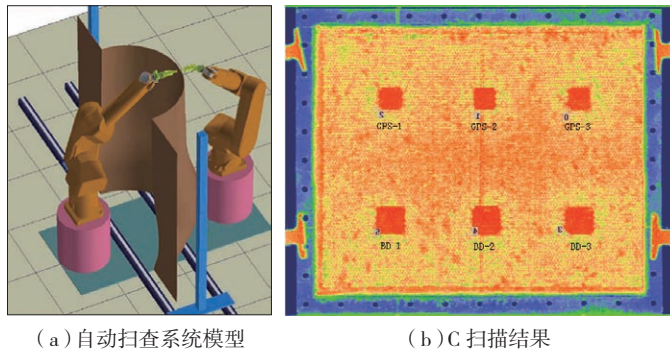


图6 对穿法自动扫查系统模型及C扫描结果

脱粘情况时,能量向下传播受阻,大部分能量横向传播被接收探头接收,声波波幅较高;若蒙皮与蜂窝芯粘接完好,由于大部分能量沿蜂窝芯传播,蒙皮内的漏兰姆波能量减少,接收信号较弱,声波波幅较低^[2]。

粘接检测仪的发射-接收模式同样利用上述原理。发射-接收模式使用的是双晶、点接触型、干耦合的超声探头。在该模式下,一系列的脉冲声能由一个晶片发送至测试工件,在工件中传播的声波由另一个晶片接收。探头晶片下的粘接状态将影响在尖端间传播的声能,见图7(a)。这些声能特性通过相位和波幅的变化显示出来。在良好的粘接状态下,一部分声能被检测表面下的

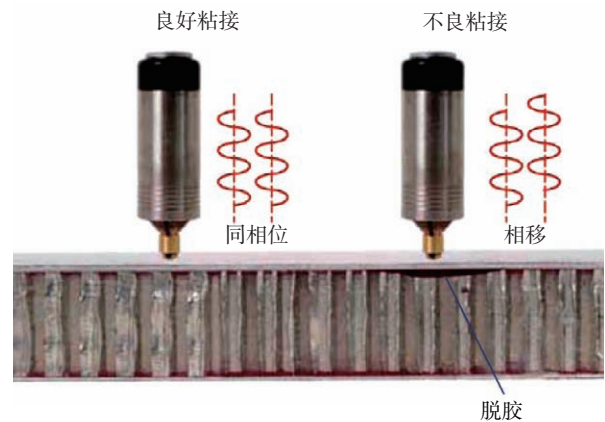
结构吸收,此时信号波幅较低。在脱粘情况下,声波在发射接收的传播过程中几乎不受蜂窝芯影响,此时信号波幅较高。粘接良好区域与脱粘区域的波幅比较见图7(b)和图7(c)。

2 机械阻抗法

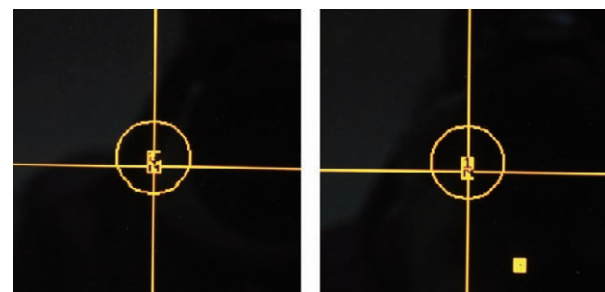
机械阻抗法也叫声阻法,它是通过测量结构件被测点振动力阻抗的变化来确定是否有异常结构的存在。机

低变化,接收晶片的负载将影响信号的波幅及相位,见图8(a)。缺陷区域的刚度取决于脱粘的尺寸和厚度。该模式下,无需耦合剂,接触面积小,尤其适用于不规则的或弯曲的表面。检测中当探头位于正常结构区时,漂点位于屏幕十字交叉线的中心;而当探头处于脱粘缺陷区时,漂点飞离十字交叉线的中心,越过圆形闸门,见图8(b)、图8(c)。

3 敲击检测法

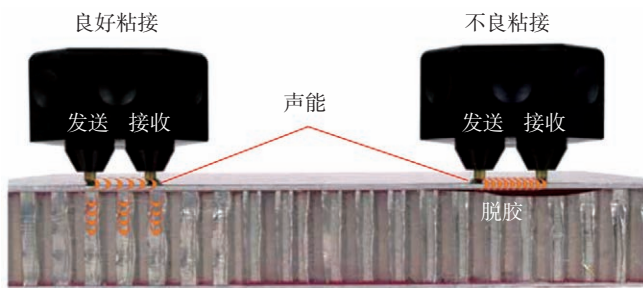


(a) 机械阻抗模式的声能传播示意图

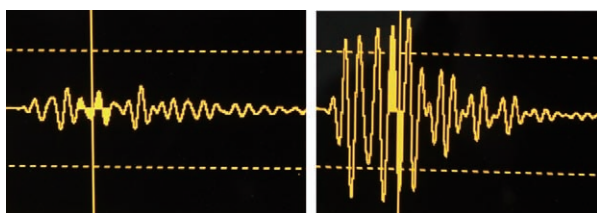


(b) 粘接良好区域波幅 (c) 脱粘区域波幅

图8 机械阻抗模式下粘接良好区域与脱粘区域信号比较



(a) 发射-接收模式的声能传播示意图



(b) 粘接良好区域波幅 (c) 脱粘区域波幅

图7 发射-接收模式下粘接良好区域与脱粘区域的波幅比较

械阻抗法使用单个尖端的双晶探头。驱动晶片发出可听见的声波进入试件。圆锥体底部接收晶片的负载受到试件刚度的影响,从粘接良好的区域到脱粘区域,负载由高到

3.1 常规轻质量物体敲击检测

该方法一般使用小锤、螺丝刀把手或硬币等质量较轻的物体,对被检测对象进行逐点敲击检测。其主要原理是当试件中存在缺陷时,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。该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,可有效检测蜂窝材料内部的脱粘、蒙皮的分层^[3]。

3.2 敲击检测仪敲击检测

电子敲击检测仪通过比较敲击

探头与被检件表面的撞击持续时间来判断被检件的粘接质量好。所谓撞击持续时间是指当敲击头敲击在被检件上,记录起始时间,敲击头弹起脱离表面,记录结束时间,这一过程为敲击头工作的撞击持续时间。

根据能量转换关系,敲击在无损伤区的撞击持续时间比有损伤区的撞击持续时间短。在实际工作时探头敲击试件良好部位的撞击持续时间作为标准参考值 T_0 ,敲击被检结构其它部位的撞击持续时间记为 T ,将比值 $R = (T - T_0) / T_0 \times 100\%$ 作为判断被检部位脱粘程度的依据,最终仪器通过一串发光二极管和声音同时进行声光报警来表征材料的脱粘程度。

4 红外检测法

红外热成像检测技术就是根据

红外辐射原理,利用红外热像仪扫描记录被测物体的表面红外辐射(热辐射)情况,并根据测得的被测物体表面热图,通过分析进而来判别结构内部是否有损伤的一种先进的无损检测技术。

红外热成像检测技术在实施过程中有多种形式,按照其有无激励可分为被动热成像和主动热成像两种形式。航空结构领域检测所采用的一般为主动热成像方式,即检测时需对被测对象外加激励(热激励、声激励、振动激励等)。对蜂窝夹芯材料,在反射式主动热成像方式下,调制激励锁相热成像所得到的检测结果较为令人满意^[4]。

5 射线检测法

当射线穿过被检测件时会发生衰减,衰减程度除了和射线本身的能

量有关,还与被检物体的性质、厚度、密度有关。如果被检件在透照方向存在一定的厚度差,那么透射射线强度就会产生一定的差异,将散射比控制在一定范围内,这种差异便会在胶片上体现出来。X射线垂直蒙皮方向透照被检件,可以有效地检出蜂窝芯内部积水、蜂窝节点开裂,蜂窝芯缺损等缺陷。

常规射线照相技术需要实时现场操作,耗费大量胶片,暗室处理耗费大量时间,计算机射线照相技术(CR)及数字化实时成像技术(DR)已经很好地解决了上述问题,且分辨率甚至优于常规射线照相技术。

各种检测方法比对分析

蜂窝夹芯结构无损检测方法的比较见表1。

表1 蜂窝夹芯结构无损检测方法的比较

检测方法	适用范围	优点	缺点
高频超声脉冲反射法	适用于检测蒙皮的分层、板芯脱粘类缺陷	检测精度高,定位、定量准确,且C扫描检测快速,结果直观	只能检测单面的缺陷,A扫描耗费人力,检测速度较低;蒙皮偏厚的情况下C扫描不适用
低频超声脉冲反射法	适用于检测蜂窝结构整体情况	检测效率高,从单面可实现对整个蜂窝结构件的检测	探头直径较大,对缺陷的具体定量困难
脉冲穿透法	适用于检测蜂窝结构整体情况	检测效率高,可一次完成整个结构件的检测	适用于机械扫查,对不可拆卸的部件实施困难
发射-接收法	适用于检测蒙皮分层,板芯脱粘类缺陷	干耦合、扫查速度快,缺陷信号明显	只能检测单面的缺陷,对缺陷的定位、定量不方便
机械阻抗法	适用于检测不规则或弯曲表面的板芯脱粘类缺陷	探头尖端直径较小,对缺陷定位准确,缺陷信号明显	耗费人力,检测速度较低
敲击检测法	适用于检测薄蒙皮结构的蒙皮分层、板芯脱粘类缺陷	无需耦合、操作简便、检测速度高	仅能检测单面缺陷,且常规轻质量物体敲击检测法检测结果易受人主观意识和环境因素影响较大,检测分辨率低
红外检测法	适用于检测蜂窝结构件的脱粘和蒙皮分层缺陷	检测快速,检测结果直观	检测结果易受外界热辐射影响,设备昂贵、体积大,不适用于外场检测
射线检测法	适用于检测蜂窝芯内积水、蜂窝节点开裂,蜂窝芯缺损等缺陷	对特定类型的缺陷检测效果较好	检测成本较高、不环保

结束语

本文所提到的几种无损检测方法均适用于蜂窝结构的检测。每种方法各具自身的优缺点。在实际检测中,考虑到检测条件的限制和检测要求的不同,为达到理想的检测效

果,可选择最优方法或综合多种不同的检测手段进行检测。

参考文献

- [1] 陈绍杰. 复合材料技术发展及其对我国航空工业的挑战. 高科技纤维与应用, 2010,35(1): 1-7.
- [2] 冯占英. 蜂窝结构的超声和声无损

检测技术. 无损探伤, 2007, 31(6): 1-4.

[3] 雷洪. 复合材料与胶接结构综合检测仪的研制. 第十二届全国无损检测新技术交流会论文集, 2011: 56-66.

[4] 詹绍正. 红外热成像检测技术在复合材料蜂窝夹芯结构上的应用研究. 结构强度研究, 2009(4): 32-36.

(责编 良辰)