

# 十二轴喷水扫查系统在复杂形状蜂窝材料检测中的应用

Application of 12-Axis Spray Scanning System in Testing of Honeycomb Material With Complex Shape

北京欧宁航宇检测技术有限公司 朱瑾锋  
哈尔滨飞机工业集团有限公司 孟凡刚



朱瑾锋

现为北京欧宁航宇检测技术有限公司检测及技术支持工程师,主要负责对金属/复合材料试块进行超声检测,并根据待检测工件的实际情况,选择合适的检测方法,并承担产品售后培训服务工作。

波音 787 大型客机机身使用的复合材料工件基本都要求进行超声无损检测,且检测要求执行波音公司的 BAC5980 标准。检测使用的检测设备,波音公司要组织进行设备的认证工作,只有当检测设备达到波音 BAC5980 标准及 BAC5317 标准后,该检测设备才可被用于波音复

合材料工件检测,所获得结果也才可以得到其认可。本文中使用的检测设备为北京欧宁航宇检测技术有限公司自主研发并拥有完全自主知识产权的大型自动喷水 C 扫描系统,该系统已经达到了波音 BAC5980 及 BAC5317 标准的要求。在此基础上,公司还进行了复杂形状复合材料的检测研究工作。

料内部都有气孔,这一点蜂窝材料表现更明显,且这 2 种材料的声衰减系数都非常高。

用蜂窝材料制成的飞机蒙皮外形几何尺寸都相对较大,形状复杂,典型的如圆锥面、双曲面、马鞍面等。这就使得用作飞机蒙皮的蜂窝材料在进行无损检测环节时有一定条件限制,如纸质蜂窝复合材料无法使用水浸法进行检测,使用接触法进行检测除了要花费大量的人力和时间外,还存在无法生成完整准确的 C 扫图形, A 扫图形无法保存等缺陷。而喷水自动 C 扫描检测方法则能很好地解决以上问题。

对应于纸质蜂窝材料或其他复合材料高衰减的特点,双探头穿透检测法具有高激发能量及相对较低的信号损失等特点,对应的使用双探头

## 喷水检测法概述

### 1 双探头喷水穿透检测法特点

纸质蜂窝结构材料主体由 3 部分构成,中间层为纸质蜂窝结构,2 侧为碳纤维层压板。这样的结构好处在于工件的整体结构重量非常轻,抗压抗冲击性能良好。同时,可维护性较高。然而对于超声检测来说,无论是蜂窝材料还是碳纤维层压板材

穿透检测法则可以很好地解决声信号衰减大,接受能量不足的问题。对应于纸质蜂窝材料等复合材料不能长期浸泡在水中的问题,使用喷水扫查方法,既可以达到良好的耦合又可以避免工件长时间浸泡在水中。且在进行喷水扫查过程中,可以根据需要灵活地调节探头与工件表面的距离,从而获得良好的声信号,提高检测信噪比。

## 2 喷水穿透检测法对检测设备机械部分的要求

要对飞机蒙皮蜂窝材料工件进行喷水穿透检测法检测,需要与之特点相应的检测设备。首先,要满足喷水耦合状态下喷头正对扫查的要求。大多数情况下检测工件并非一个曲率为零的平面,而是一个固定曲率的曲面或由2个或2个以上不同曲率的曲面构建的具有复杂外形的工件。因此为了得到良好的穿透信号,就要求入射探头垂直于工件表面入射。所以扫查设备必须要保证在进行工件扫查过程中,检测设备的机械轴要精确控制喷头指向,让其时刻指向被扫查工件的表面法向。

一般检测设备为龙门式框架结构,有2个独立扫查臂并可以完成同动扫查。在进行喷水穿透扫查过程中,2个喷头需要时刻保持对正状态,可以将喷头理解为同一个圆周上的处于同一直径的2个点。与此同时需要保持对工件曲面良好的入射角度,无论曲面的曲率如何变化,均可以获得一致性良好的C扫图象。保证只要是相同厚度的相同材质的复合材料工件,无论其为平板件还是曲面件,其扫查结果均有一定的可比性,为C扫图形后续分析工作奠定良好的基础,可以使用平板型的试块对曲面工件的缺陷进行评定。

为了给扫查结果提供良好的重复性,使检测结果具有高可信度,要求检测设备必须具有良好的重复定位精度和很高的定位精度。按照波

音BAC5980标准的要求,无论扫查工件的长度、高度是多少,扫查结果与物理长度之间的差值不得超过 $\pm 12\text{mm}$ 。检测系统装有于喷头同轴转动的喷气装置,用于减少喷头喷出的水柱击打到工件表面后飞溅的水花对扫查结果的影响,提高扫查结果信噪比。在喷头的前端,检测系统还配有机械防撞装置,这样的设计使得当发生操作人员操作失误或系统故障后,降低或避免扫查系统与工件或其他设备发生碰撞时造成的损失。

## 3 检测设备超声系统要求

试验使用的检测工件为变厚度工件,厚度从最薄的5mm到30~40mm之间,而且工件薄的地方大部分为层压板结构,厚的位置均为蜂窝结构,所以不同厚度的声衰减值也是非线性的。

除此以外,对于像粘接厚蜂窝材料,普通的超声波探伤仪驱动下的探头发射出的声信号根本无法穿透工件,即使穿透也因为穿透信号的强度过低,扫查结果不具有良好的信噪比而无法进行分析,即扫查结果是无效结果。

以上2个问题,在外加“对数放大器”和“脉冲发射器”2台仪器后得到了很好的解决。

对数放大器与普通超声探伤仪相连接后,可将普通超声探伤仪改造为一种动态范围100dB(该数值与测试环境有关)的衰减型探伤仪。这样在检测变厚度及衰减非线性的工件时,不用担心信号强度不足或信号过强,可以将工件一次进行完整的扫查,同时仍可提供良好区分度,而这也是波音对工件检测的要求之一。按照波音的要求,该仪器的垂直线性误差必须在 $\pm 2\text{dB}$ 以内。

脉冲发射器与普通超声探伤仪相连接,提供给探头更多发射能量,提高透射声信号的强度。相比较于普通的激发电压为300V的超声波

探伤仪,在同等测试条件下,使用脉冲发射器后穿透信号一般会比未使用前提高16dB(该数值与测试环境有关)。

## 检测过程

### 1 待扫查工件特点

对于检测系统来说,在进行扫查过程时要有一个主要的扫查方向,当工件的扫查计划制作过程是依照该扫查方向而制作的时,将会提高工件的扫查效率,并有效降低系统负荷。

波音公司待检测的工件基本可以视为在X方向基本平直,而在Z向有着一定曲率变化的复杂曲面。所以,在制作扫查计划的时应沿着X方向制作扫查计划,并具有扫查过程系统喷头转动角度较小的特点,在经过合理的优化后,系统扫查线将是由渐变平滑曲线组成,更有利于工件检测。

### 2 扫查计划的制作

确定工件主要扫查方向后,紧接着就是制作工件的扫查计划。而在制作系统扫查计划之前,需要保证系统各个轴物理坐标是准确的。在无法保证的情况下,需要进行系统“初始化”操作,该操作将使得系统各个轴返回到系统坐标系中正确的初始位置。

完成以上检查后,即可进行工件的扫查计划制作,即“仿形”工作。“仿形”就是将工件的外形特征准确的告诉计算机的一个过程。计算机中生成的工件的数据模型与实际工件的相似度越高,则扫查完成后生成的C扫图更能准确地反映出工件内部真实信息,可比较性越高。

系统提供了2种进行工件仿形的方法。第一种是操作人员通过操作系统扫查臂,在工件上寻找用于描述工件特征的特征点并记录到软件中。同时,系统还将自动记录特征点附近区域的法向量。通过逐点教学,最后计算机根据这些特征点计算出

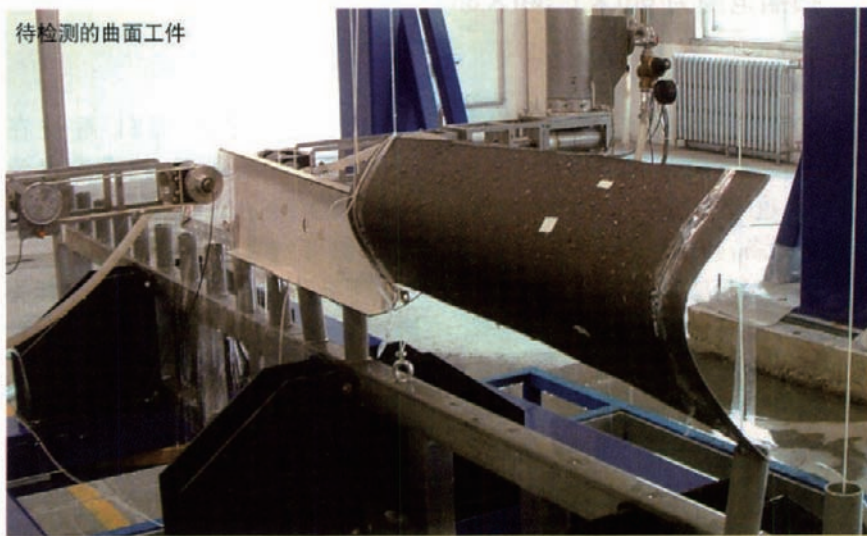
工件的外形参数,并进行扫查。该方法的特点是简单易学,只要有工件实物就可以对其进行扫查,不需要太多的准备工作。

第二种是由待测工件的设计方提供工件的数据模型,并将其转化成特定格式的文件后,上传给计算机系统。然后再根据待检测工件在扫查系统坐标系中的具体位置,对上传的文件进行修改后生成最终的扫查计划。这种方法的特点是计算机生成的工件模型与实际外形匹配性非常高,同时操作人员的工作量会有较大幅度减少。但同时这种方法对操作人员的要求也相应有所提高,且需要待测工件的工程数据模型。

### 3 C扫图形生成

C扫描图的生成过程是一个实时过程,可以随时对已经扫查过的区域进行实时的察看。系统为C扫描图提供256级调色板,调色板配色方案系统默认提供4种,需要时用户也可自行定义调色板配色方案。

待检测的曲面工件



### 结果分析

对系统生成的C扫描图进行保存后,即可对C扫图进行分析,以判断该工件是否可用。除此以外,系统提供的其他辅助分析功能还有:扫查图像放大功能、C扫查结果的数据柱状图统计、简单面积测量功能、

调色板色谱渐变功能、注释及标注功能、C扫查图3D化等。

#### 1 信噪比分析

波音公司的BAC5980标准中要求C扫描图像中分析得到的各区域的信噪比最少要达到2.5:1,否则C扫描图不可用。

波音计算信噪比的公式为:信噪比 = (缺陷信号值 - 正常区域信号值) / 标准偏差。

其中,正常区域信号值是指在不存在缺陷的相同材质相同厚度的工件区域内得到的声信号平均值;标准偏差是指在取得正常区域信号值得同一个区域内的到该区域内声信号的标准偏差;缺陷信号值是指能准确判定工件中人工缺陷的面积大小(面积偏离最大为实际缺陷面积的25%),所使用的阈值。

#### 2 缺陷面积分析

波音公司的BAC5980标准中提到,无论被扫查工件外形为平面、曲面或复杂曲面,也无论工件中缺

标准评定试块,并分析标准试块中的人工缺陷面积是否符合要求,只有分析得出C扫图像的缺陷面积与标准试块中的缺陷面积符合上述要求后,才可以使用系统进行工件扫查、分析。分析缺陷时,使用系统软件提供的柱状图统计功能,再在正常区域内选择采样区域,则可得到该区域内的信号平均值。将信号平均值减去12dB后得到的数值填写到面积分析闸门相关的表格内,设置好闸门值。然后使用鼠标选择缺陷采样区域,软件将自动对该区域进行分析,并自动计算出缺陷面积的大小,同时缺陷将会用轮廓线圈起来。如果操作者选取的采样区域存在多个缺陷,软件将自动进行编号标注。

#### 3 缺陷定位

按照波音5980标准要求,工件C扫图中缺陷位置与缺陷在工件中的实际位置之间的偏离不能大于12mm。系统提供了2种方案来解决缺陷定位的问题。

第一种是使用C扫分析软件,在C扫图像上使用软件提供测量距离工件的某一个边角特定位置到图像中缺陷的距离,然后在使用尺在工件上进行测量标记缺陷位置。

第二种是系统有返回缺陷点功能,即在C扫图上选取某一个点,然后使用鼠标点击软件提供的“返回分析位置”按钮,系统则可以准确地返回到工件上该点位置,这时候喷头指向的工件上的点即为缺陷点位置,从而对缺陷位置进行定位标注。

### 结束语

由试验可知,喷水自动C扫描系统在航空大型复合材料工件及复杂形状复合材料工件的检测中,可以完成全覆盖,并实现高精度检测。在降低检测难度的同时提高了检测效率,为产品的质量可靠性提供了良好的技术支持。

(责编 微凉)

陷的出现位置在哪里,都要求C扫描图中的缺陷面积与实际缺陷面积相差最大偏差不能大于实际面积的25%。同时,波音要求评定缺陷过程时,缺陷闸门值为同材质同厚度区域声信号降低12dB后的值,即缺陷评定闸门 = 正常区域信号值 - 12dB。

分析工件扫查图前,需要先扫查