

复合材料喷水超声检测工艺

王柄方¹, 韩赞东¹, 原可义¹, 陈以方¹, 黄志刚²

(1. 清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084;
2. 北京固鸿科技有限公司, 北京 100083)

摘要:为研究航空复合材料喷水超声穿透法检测工艺, 研制了专用的喷嘴和探头, 建立了一套复合材料超声喷水检测试验系统。基于此系统, 对喷水速度、喷水距离和喷水角度等参数对超声检测的影响规律进行了试验研究。研究结果表明, 这些工艺参数对检测结果都有较大影响, 提出了参数的合理选择范围。该研究对复合材料喷水超声自动检测系统的设计和检测工艺参数的优化具有重要的意义。

关键词:复合材料; 喷水; 超声波检测; 检测工艺

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2010)08-0616-04

Research on Water-Squirting Ultrasonic Testing Parameters for Composite Materials

WANG Bing-Fang¹, HAN Zan-Dong¹, YUAN Ke-Yi¹, CHEN Yi-Fang¹, HUANG Zhi-Gang²

(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Dept. of Mech. Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Granpect Company Limited, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study ultrasonic through-transmission testing technique based on water-squirting coupling for aerospace composites, a water-squirting ultrasonic testing system is developed, with specific nozzle and two probes being designed and applied in the system. Based on this system, the water-squirting parameters, such as squirting speed, squirting distance and squirting angel are experimentally studied, and the affecting regulations are obtained. Experiments show that technical parameters greatly affect testing results, and their reasonable ranges of choice are given. The conclusions are of great significance for design of automatic water-squirting ultrasonic testing system and optimization of the testing technical parameters.

Keywords: Composite materials; Water-squirting; Ultrasonic testing; Testing parameters

在航空制造等领域中, 复合材料, 尤其是碳纤维复合材料, 以其高的比强度、比刚度及良好的抗疲劳性和耐腐蚀性获得了广泛应用^[1]。由于复合材料独特的制作工艺, 导致其缺陷类型与传统材料有所不同, 主要有分层、脱胶、疏松、夹杂和树脂固化不良等^[2]。这些缺陷的存在会导致碳纤维复合材料性能的显著下降, 必须进行无损检测。

超声检测是复合材料无损检测常用的方法^[3]。由于超声波在复合材料中的衰减和散射比金属材料

要严重得多, 因此声程短的穿透式超声检测方法应用更为普遍^[4]。为了实现大型三维复合材料构件的自动检测, 采用水柱进行超声耦合的喷水超声检测是比较理想的选择^[5]。喷水超声检测属于超声穿透法, 它通过接收探头检测到的超声信号的强弱来检测材料的缺陷。

为了提高缺陷检测的可靠性和灵敏度, 要求超声在传播过程中的衰减要尽可能小。检测参数如探头直径和频率、水柱直径、喷水速度等会对超声的衰减产生明显的影响。另外, 对于三维曲面构件, 水柱的长度, 以及水柱法线和工件表面法线的偏离也会影响到超声波的接收。为此, 笔者将构建复合材料喷水超声检测系统, 并通过试验, 研究喷水速度、喷

收稿日期: 2009-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871101)

作者简介: 王柄方(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超声检测技术及信号处理技术。

水距离和喷水角度等工艺参数对超声衰减的影响规律。研究成果对于复合材料喷水超声自动检测系统的设计和检测工艺参数的优化具有重要的意义。

1 喷水超声检测系统建立

为了进行复合材料喷水超声检测工艺试验,建立了图 1 所示的喷水超声检测系统。

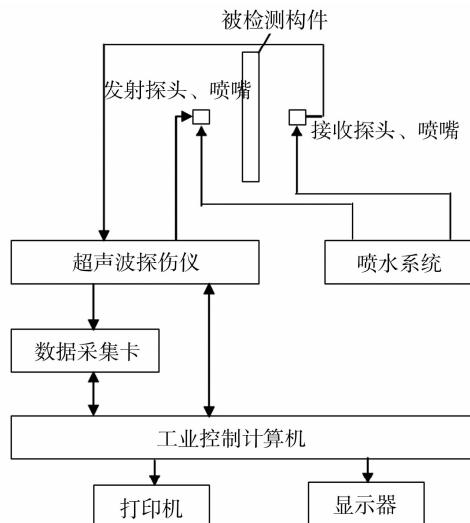


图 1 喷水超声检测试验系统

超声探伤仪采用 GE 检测科技的 USIP40, 配置有 5 个超声通道, 可以进行实时数字化 A 扫描。喷水系统的喷水流量可控, 水柱长度和喷水角度也可以通过探头架来调节, 以满足不同的检测需求。笔者自主研制了超声换能器和喷嘴。

1.1 超声换能器

超声换能器设计的两个主要问题是确定压电晶片的厚度和直径。对于纵波直探头, 压电晶片的厚度决定了设计频率:

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad (1)$$

式中 c_L ——压电片中的纵波声速;

f ——换能器设计频率。

选用压电材料 PZT-5, 其纵波声速 $c_L = 4350 \text{ m/s}$, 计算得到设计频率在 1 MHz 时的厚度 $d=2.175 \text{ mm}$ 。实际采用四片厚度 $d_0=0.544 \text{ mm}$ 的压电晶片, 机械上串联, 电气上并联。这样做的原因是增大电容, 提高超声发射的功率。

压电晶片直径的确定主要考虑超声波的穿透能力、缺陷检测的灵敏度。大的压电晶片直径使得缺陷检测灵敏度下降, 小的压电晶片直径使得检测工作量加大。综合考虑选择压电晶片直径 $D=10 \text{ mm}$ 。

水柱的直径只需比压电晶片直径略小即可, 选择为 $D=8 \text{ mm}$ 。设计的超声换能器如图 2 所示。

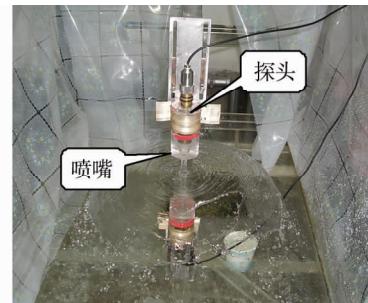


图 2 喷水效果图

1.2 喷嘴

喷水超声检测将超声换能器置于喷嘴内部, 超声沿着喷嘴喷出的水柱传播。设计合适的喷嘴对检测系统的建立十分重要。水柱应该保证超声在其中传播而受到尽量少的干扰, 并且实现流速和喷水角度可控。设计的喷嘴喷水效果如图 2 所示。

2 喷水超声检测工艺研究

复合材料样板是某航空制造公司提供的人工缺陷板, 板的制作过程中预埋了九个缺陷, 缺陷位置已知。样板的大小为 $217 \text{ mm} \times 217 \text{ mm}$, 厚度 $d=4.7 \text{ mm}$ 。试验中, 超声扫查方式为 A 扫描, 接收到的超声波形高度表征了超声的声压。

研究的喷水超声检测的工艺参数包括喷水速度、喷水距离和喷水角度等。研究某一参数对检测的影响时, 可以在固定其他参数的情况下把其当作变量, 在一定范围内调整此参数, 测量在有缺陷和无缺陷部位检测的接收波高度, 如果两者接收波稳定且两者差别明显, 表明此参数可以用于检测, 否则不能用于检测。

检测使用的探头频率为 1 MHz, 直径 10 mm, 水柱直径 8 mm, 三者固定不可调整。超声探伤仪的增益设置为 50 dB。

2.1 喷水速度对检测的影响

喷水速度直接决定了水流的雷诺数, 是影响水流层流的重要参数。流速达到一定数值时, 水流将由层流变为紊流, 超声在其中传播产生衰减和散射, 不利于喷水超声检测。研究喷水速度时, 其他工艺参数分别是: 喷水角度 0°, 探头间距 160 mm, 发射探头距离样板 78 mm, 接收探头距离样板 77.3 mm。

试验表明, 体积流量 $<4 \text{ L/min}$ 时, 下水柱喷射高度不够(此处体积流量是指两个喷嘴的体积流量

之和,可以认为单个喷嘴的体积流量是其一半)。体积流量 5 L/min 时,检测结果如图 3 所示。

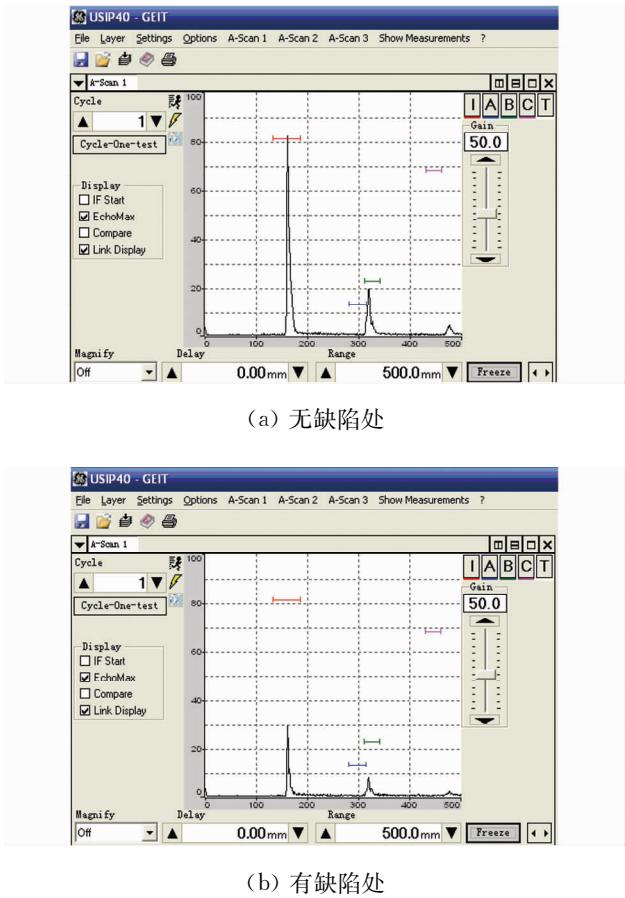


图 3 体积流量 5 L/min 时的检测结果

以上两个波形都是采集到的瞬时波形,实际的接收波幅值在一定范围内变化。因为喷水系统中电机的工作受到到电网电压的影响,喷出的水柱很难做到绝对稳定。但在喷水速度不大时,接收波幅值的变化范围较小。增大喷水速度,检测同一个缺陷,得到的试验结果如图 4 所示。

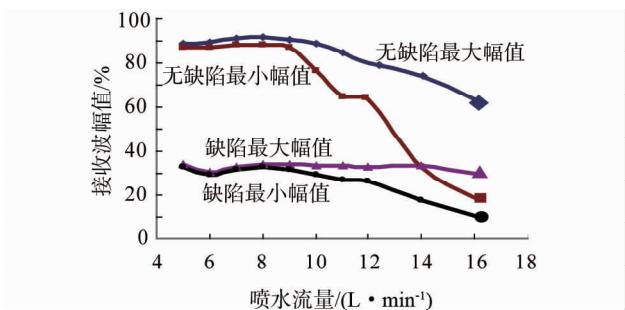


图 4 喷水速度对检测的影响

喷水速度很小时,竖直喷射时下水柱高度不够,无法用于检测。喷射速度较大时,水流趋于紊流,影响了超声的传播,导致无缺陷处和缺陷处的接收波

幅值波动,且喷射速度越大,两者的幅值变化范围越大。在流速增大到某一值时,两者的变化范围产生交集,则无法用于检测。

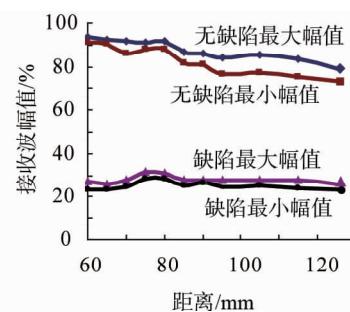
从图 4 中可见,在前述试验条件下,用于检测的最佳喷水流量为 5~9 L/min。在这个流量区间内,由于超声在水中的速度远大于水的流速,喷水流量对检测结果的影响很小。如果为了提高水柱刚度,或提高下水柱的喷射高度,可以采用稍大的喷水流量,但不应该>12 L/min。喷水流量>9 L/min 时,增大喷水流量对检测结果准确性会产生负面影响。

2.2 喷水距离对检测的影响

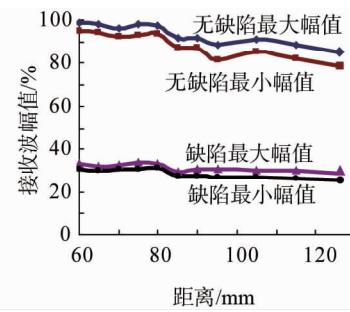
喷水超声检测中,探头不与被检工件直接接触,超声通过水柱耦合,传播到工件中,因此适合检测形状比较复杂的构件。喷水距离直接决定了超声在水中传播的距离,因此喷水距离影响超声检测的结果。

喷水距离包括超声发射端水柱长度和超声接收端水柱长度。先通过试验,研究发射端水柱长度对检测的影响,试验中取喷水流量 8 L/min,喷水角度 0°,接收探头距离样板 80 mm。再研究接收端水柱长度对检测的影响,试验中取喷水流量 8 L/min,喷水角度 0°,发射探头距离样板 80 mm。

在 60~125 mm 的范围内,分别调整发射探头和接收探头与样板的距离,检测样板的无缺陷处和有缺陷处,接收到的超声信号幅值变化示于图 5 中。



(a) 发射探头与样板之间



(b) 接收探头与样板之间

图 5 喷水距离对检测的影响

从图 5(a)中可以看出,随着发射探头与样板距离的增大,收到的超声信号声压减小,这是因为超声在水中传播的距离越长,产生的衰减越大。在 60~105 mm 长度范围内,超声虽有衰减,但并不明显,因此根据实际需要,发射探头到样板的距离在此范围内可以满足检测要求。

从图 5(b)中可以看出,接收探头到样板的距离对检测的影响与发射探头的影响基本相同,原因都是探头与样板距离越大,超声传播距离越长,衰减越大。对接收探头而言,与样板最佳距离也是 60~105 mm,可以根据实际情况调整探头和样板之间的距离。

2.3 喷水角度对检测的影响

被检工件外表面可能是曲面,喷水检测的过程中随着喷水方向和工件相对位置的变化,很难保证水柱垂直喷到工件表面。因此需要研究水柱喷射角度对检测的影响。文中的喷水角度是指,过被检工件外表面检测点上的法线与水柱直线所成的角度。如果水柱垂直喷射到工件表面上,那么喷水角度应为 0°。

通过加高样板一端的方法来调整喷水角度,在竖直喷水的条件下,样板平面与水平面所成的角度就是喷水角度。要实现喷水角度为 α ,则要把样板一侧加高 h :

$$h = 217 \sin \alpha \quad (2)$$

研究喷水角度试验中,取喷水速度 8 L/min,两探头间距 160 mm,试验结果如图 6 所示。

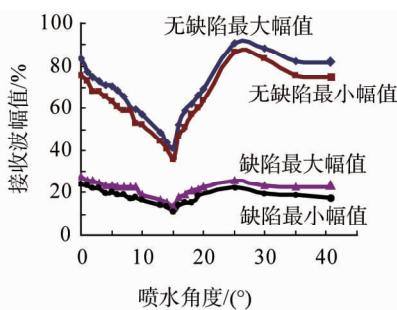


图 6 喷水角度对检测的影响

从图 6 中可以看出,检测样板的相同部位,喷水角度<15°时,喷水角度增加则接收到的超声声压减小,喷水角度在 15°~25°之间时,增加角度则接收到的超声声压增加,在喷水角度>25°时增大角度,接收到的超声声压缓慢下降。复合材料样板由多层碳纤维材料粘接而成,超声波在其中的反射和折射行为比较复杂,最终穿透界面射出样板的超声波可能

经过几次波型转换,各个固-固界面的横波和纵波的透射系数与声速和入射角有关,最终的射出超声波可能经由不同的路径,经历不同的波型转换,它们射出的位置不同,角度也可能不同。可以理解为射出的超声波分为很多束。由于接收端水柱的直径和角度所限,实际接收的超声波可能是它们中的一部分,随着喷水角度的变化,接收到的超声波能量发生了上述变化。

2.4 水平喷水条件下的试验

在竖直喷水的条件下,水柱的重力不会使其发生弯曲。水平喷水的条件下,水柱在重力的作用下容易发生弯曲,理论上成抛物线状。水柱的弯曲显然不利于喷水超声检测,因此在实际应用中一般将让水柱喷出的方向与水平面向上成一定的角度,这样两水柱在空中相遇点附近的水柱是水平的。

把样板置于两喷嘴的中间平面内,调整喷水方向,使两个水柱在中间平面上相遇,中间平面两侧一定范围内的水柱是近似水平的。调整喷水速度为 9 L/min,两水柱从喷嘴喷出时其中心距离为 120 mm。向一个喷嘴的方向移动样板,移动过程中保证两喷嘴不动。检测结果如图 7 所示。偏离距离是指样板离开两个喷嘴中间平面的距离。

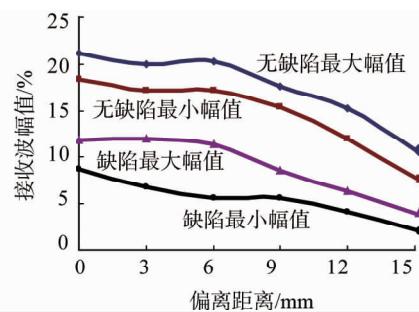


图 7 检测样板偏离两喷嘴中心平面距离与检测结果

由图 7 可以看出,水平喷水试验中接收到的超声声压比同样喷水速度和水柱长度情况下竖直喷水、垂直入射时小很多。原因是由于调整了水柱的喷出方向,两个探头的晶片平面没有保持平行,发射探头发射的超声只有一部分被接收探头接收到,超声在弯曲的水柱中传播导致了更大的能量损失。样板在两喷嘴中心平面左右 9 mm 范围内移动时对检测结果影响不大,若偏离的距离再增大,喷射到样板两侧水柱的中心产生错位,接收到的超声声压显著变小。

(下转第 630 页)

初步检测,确定堵头和管桥位置,对可疑部位再用双晶直探头 MSEB4H 和纵波双晶斜探头 VSY70 进行复验和精确检测。

(1) 初步检测

用单直探头 MB5F 对堆焊层进行初步检测,只要信噪比满足要求,且管桥与堵头 0.2 mm 间隙所造成的反射波不影响对缺陷的判定,就应适当地提高检测灵敏度。

检测时找出 30 mm 堵头底面回波的最高点,按 6 dB 法测出其边缘位置,即为管桥与堵头之间的间隙,进而确定管桥所处的部位,做出标定,为精确检测做好准备。

检测时对未出现堵头底面回波的部位,即管桥部位进行关注。对出现的非间隙部位的可疑信号均应做出明确标记,以便按 JB/T 4730 标准中 3.3 条的验收准则进行精确检测。

(2) 精确检测

在单直探头 MB5F 检测的基础上,分别使用 MSEB4H 双晶直探头和 VSY70 双晶纵波斜探头对初步检测时确定的管桥部位可疑信号进行精确检测(即对深度为 8 mm 的反射信号、深度 <8 mm 的堆焊层内反射信号、对深度 $>8\sim10$ mm 的反射信号进行校核)。以便确定反射信号是否属于缺陷反射,

(上接第 619 页)

3 结论

(1) 随着喷水速度的增大,水流趋于紊流,超声的衰减加重,不利于检测。试验条件下水流稳定的喷水流量为 5~9 L/min。

(2) 喷水距离增大,不利于检测,在满足检测位置要求的前提下应尽量选择小的喷水距离。

(3) 喷水角度在 0°~15° 范围内,超声检测信号随着角度增加而减小,在满足检测位置要求的前提下应尽量选择小的喷水角度。

(4) 水平喷水条件下,水柱在重力作用下发生弯曲,超声波在弯曲的水柱中传播导致了更大的能量损失,不利于检测。

另外,探头的频率和直径、喷嘴的结构等也会对喷水超声检测产生重要影响,笔者将在后续工作中

进而确定是否属于堆焊层与母材未熔合、堆焊层内缺陷、母材裂纹等超标缺陷,且按 JB/T 4730 标准中 3.3 条进行验收。

堆焊层下母材裂纹缺陷随着材料的改进和焊接工艺的成熟已很少见^[2]。笔者所在公司自 1987 年以来承制的加氢、核电设备中不锈钢堆焊的设备部件,经超声波检测均未发现堆焊层下裂纹缺陷;其次该管板母材为 20MnMo 钢件,只要焊接工艺正确,无再热裂纹倾向,故笔者认为该管板堆焊层下母材裂纹类缺陷只要措施得当是可以避免的。即便如此,笔者仍对该缺陷出现的可能性加以了足够的关注,在该管板的堆焊层检测中未发现堆焊层下母材裂纹缺陷。

采用上述超声波检测工艺对钻孔后管板堆焊层进行检测,极大地提高了检测速度,保证了检测质量,确保了在最短的时间内修复好设备,最大限度地减少了客户的损失,截至目前该设备运行良好。

参考文献:

- [1] JB/T 4730.3—2005 承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测[S].
- [2] 强天鹏.承压设备无损检测学习指南[M].北京:新华出版社,2005:157.

对这些参数的影响规律进行研究。

参考文献:

- [1] 陈先有,曹金华,黄俊波.航空用复合材料结构件无损检测技术分析[J].国防技术基础,2007,7(8):11~14.
- [2] 刘怀喜,张恒,马润香.复合材料无损检测方法[J].无损检测,2003,25(12):631~634.
- [3] Karl V Steiner, Rushad F Eduljee, Xiaogang Huang, et al. Ultrasonic NDE techniques for the evaluation of matrix cracking in composite laminates[J]. Composites Science and Technology,1995,53(2):193~198.
- [4] Balasubramaniam K, Sean C Whitney. Ultrasonic through-transmission characterization of thick fibre-reinforced composites[J]. NDT&E International,1996,29(4):225~236.
- [5] 李光浩.现代民用飞机复合材料的无损检测[J].无损检测,2001,23(5):213~214.

欢迎浏览“材料与测试网”,网址:www.mat-test.com