

图1 厚板扩散焊基本形式
Fig.1 Types of DB interfaces in thick plate

扩散焊接,其扩散焊接区的冶金组织与母材一样,即不会出现扩散焊界面^[4-5];对超声波而言,在正常扩散焊接区,不会产生声波反射。当出现意外的工艺原因时,可能会在扩散焊接区产生缺陷,而且不论是图1中哪种类型的扩散焊接界面形式,其可能产生的实际工艺缺陷在大多数情况下可以分为两类:(1)宏观未焊合,这种缺陷比较容易检出,而且随着扩散焊工艺和装备水平的不断提高,目前这种缺陷不容易产生;(2)紧贴性未焊合,通常这类缺陷具有显著的微细、紧贴和弥散分布的特点,从而会导致常规超声对这类缺陷的检出困难^[4-5](射线等其他检测方法对这类缺陷的检出能力远不如超声方法灵敏)。

NLU 成像检测方法

1 NLU检测基本原理

NLU 检测是基于超声波在厚板扩散焊中的传播产生的非线性超声行为进行检测,这种检测方法对微细紧贴缺陷有较好的检出能力,这主要得益于入射声波在这种缺陷周围产生的非线性声学行为更加灵敏。如图2所示,利用入射声波从厚板扩散焊的一侧入射,形成入射声波 $P_I(f_1, t)$,此时,在扩散焊接界面形成的入射声波 $U_I(f_1, t)$ 可近似表示为:

$$U_I(f_1, t) = T_0 P_I(f_1, t) e^{-\alpha_1(f_1)x_1} \quad (1)$$

式中, T_0 为入射声波在被检测扩散焊零件表面的声压透射系数; f_1 为入射声波的频率; t 为入射声波传播时

间; $\alpha_1(f_1)$ 为入射声波在扩散焊母材中的声衰减系数,与入射声波的频率、材料特性等有关; x_1 为入射声波从被检测扩散焊零件表面传播至扩散焊接界面的距离,这里仅考虑入射声波沿扩散焊零件厚度(x)方向的一维传播情况。

(1)当扩散焊接界面没有缺陷即正常焊接时,如图2(a)所示(注:图中浅灰色虚线仅是为了示意扩散焊界面,实际上正常扩散焊是看不到界面的^[4-5]),此时考虑到 $U_I(f_1, t)$ 在扩散焊接区传播产生的非线性作用,对于同种材料扩散焊,在扩散焊接界面形成的非线性高阶透射谐波 $U_T(f_2, t)$ 可近似表示为:

$$U_T(f_2, t) = R^{2n} U_I(nf_1, t) e^{-\alpha_2(nf_1)x_2} \quad (2)$$

式中, n 为入射声波在扩散焊接区形成的非线性高阶谐波次数; R 为入射声波在扩散焊零件表面的声压反射

系数; $\alpha_2(nf_1)$ 为入射声波在扩散焊母材中的声衰减系数,与入射声波的频率和非线性高阶谐波次数等有关; x_2 为非线性高阶谐波在扩散焊中的传播距离; $f_2 = nf_1$ 为非线性高阶谐波的频率。

由式(1)和式(2)可得,此时在扩散焊零件表面另一侧接收到的第 n 次非线性高阶谐波 $P_T(f_2, t)$ 可近似地表示为:

$$P_T(f_2, t) = T_0 R^{2n} P_I(nf_1, t) e^{-\alpha_1(f_1)x_1 + \alpha_2(nf_1)x_2} \quad (3)$$

(2)当扩散焊接界面存在缺陷时,如图2(b)所示,此时在扩散焊接界面形成的非线性高阶谐波由 $U_T(f_2, t)$ 和 $U_R(f_2, t)$ 两部分构成,此时接收到的第 n 次透射非线性高阶谐波和反射非线性高阶谐波 $P_R(f_2, t)$,可近似地表示为:

$$P_T(f_2, t) = R_w^{2n+1} T_0 R^{2n} P_I(nf_1, t) e^{-\alpha_1(f_1)x_1 + \alpha_2(nf_1)x_2} \quad (4)$$

$$P_R(f_2, t) = R_w^{2n} T_0 R^{2n} P_I(nf_1, t) e^{-\alpha_1(f_1)x_1 + \alpha_2(nf_1)x_2} \quad (5)$$

式中, T_w 为非线性高阶谐波在扩散焊界面的透射系数,此时 $T_w = T_w(\Delta h, \Delta S, nf_1)$,即 n 次非线性高阶谐波在扩散焊界面的透射和折射与扩散焊界面缺陷的紧贴程度 Δh 、扩散焊界面的焊合率 ΔS 、频率、非线性高阶谐波次数 n 等密切相关^[1-2]; x_2 为 n 次非线性高阶谐波在扩散焊中的传播距离。

由式(3)和式(4)可见:在厚板扩散焊界面存在缺陷和没有缺陷时,其透射非线性高阶谐波明显不同,而且这种差异随 n 值的增加而愈大,从而越易检出扩散焊界面缺陷。

由式(3)和(5)可见:在厚板扩散焊界面存在缺陷和没有缺陷时,其反射非线性高阶谐波明显不同,而且这种差异随 n 值增加而愈大,从而越易检出扩散焊界面缺陷,NLU成像即是基于此原理进行厚板扩散焊的可视化成像检测。

2 NLU成像方法

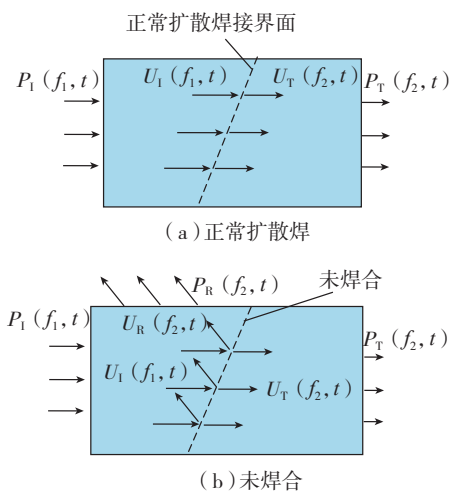


图2 NLU检测原理
Fig.2 NLU principle

NLU 成像基于入射声波在厚板扩散焊中产生的 NLU 现象,进行大厚度扩散焊的无损检测。通过专门设计的超声单元产生宽带超声信号,激励超声换能器,在扩散焊中形成入射声波,作为 NLU 入射信号,利用另一宽带换能器在被检测扩散焊零件的一侧或者对侧接收非线性高阶谐波,经过信号处理和数字化后,由计算机成像系统对检测结果进行成像显示,发射/接收换能器在扫描系统的作用下,实现对被检测扩散焊零件的自动扫描,其位置信号实时送到计算机成像系统,最后由计算机根据所接收到的超声信号和位置信号,按照给定的非线性成像算法对检测结果进行可视化成像,其基本原理和构成如图 3 所示。

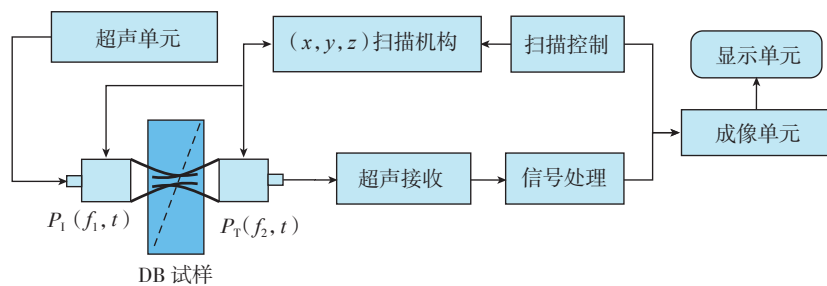


图3 NLU成像方法
Fig.3 NLU imaging method

利用 NLU 成像模块,通过构建非线性函数 $H_n(nf_1, \tau)$,用于从非线性谐波信号 $P_T(f_2, t)$ 中获取 NLU 成像的非线性谐波分量 $U_{rgb}(f_2, t)$:

$$U_{rgb}(f_2, t) = H_n(nf, \tau)P_T(f_2, t) \quad (6)$$

式中, τ 为时间窗口,由所选取的高阶非线性谐波次数 n 设定; $U_{rgb}(f_2, t)$ 对应成像灰度或者色彩值。

因此,利用入射声波在厚板扩散焊中产生的非线性声波现象,通过合理的信号发射/接收技术、处理技术和扫面技术,即可实现厚板扩散焊的 NLU 成像检测。

试件设计制备与 NLU 成像系统

1 试件设计制备

所有试样均采用图 1 (b) 所示的扩散焊接形式,其中试件 1 为正常扩散焊接工艺,即在扩散焊接界面没有预置缺陷,试样厚度为 70mm,长 210mm,高 60mm (图 4),材料为钛合金;试件 2 亦为正常扩散焊接工艺,只是在扩散焊接界面预置有 4 个不同大小的模拟焊接缺陷,缺陷模拟方法为:采用对扩散焊界面局部表面污染的方法模拟紧贴型扩散焊接缺陷,试样厚度、长度、高度及其材料与试件 1 相同。用于扩散焊接试件制造的母材为无内部缺陷的合格厚板钛合金材料。

2 NLU 成像检测系统

检测试验采用中航复合材料有限责任公司 MUI-21 超声自动扫描检测系统中,该系统含有用于 NLU

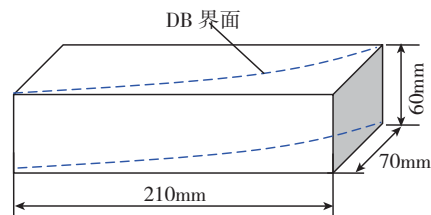


图4 厚板扩散焊试件的结构形式
Fig.4 Structure of thick plate diffusion bonding

能器从试件的一侧发射入射声波(参见图 2 和图 3),接收换能器从试件的另一侧接收 NLU 信号(参见图 2 和图 3),然后,基于此信号进行 NLU 成像,扫描速度和步进速度均选择 30mm/s,步进量选择 0.3mm。图 5 中四周黑色灰度分布对应试件的周边,其中上中部出现的矩形黑色灰度区 F_0 为夹持试件的夹具部位,且灰度越亮,对应的 NLU 信号越强烈。

图 6 是正常厚板扩散焊试件 2 的 NLU 成像检测结果,所用的 NLU 成像检测条件和工艺参数均与试件 1 完全相同。图 6 中四周黑色灰度分布对应试件的周边,除了在上中部出现的矩形黑色灰度区 F_0 为夹持试件的夹具部位外,还出现大小不同、位置不同的 4 个黑色灰度区 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 。此外,在图 6 中的中心部位附近出现了一些弥散分布的深灰色点状灰斑,如图 6 中黑色箭头所示的灰度分布区 F_5 、 F_6 所示。

2 结果分析

(1) 从图 5 中的 NLU 成像可以非常清晰地看出,除了在对应试件夹持位置出现了灰色灰度分布区(如图 5 中黑色箭头指示的灰度分布区 F_0) 外,其他部分的灰度分布非常均匀。这是因为在试件夹持位置,声波不能穿过夹具,导致接收不到声波信号,即此时 $P_T(f_2, t) \approx 0$,由式(6)可知,其对应成像灰度 $U_{rgb}(f_2, t) \approx 0$,因而在图 5 中对应试件夹持位置出现了矩形黑色灰度分布区 F_0 ;

(2) 在图 5 中除了对应 F_0 以外的位置,来自试件 1 的 NLU 成像的

检测结果与分析

1 检测结果

图 5 是正常厚板扩散焊试件 1 的 NLU 成像检测结果,用于 NLU 成像检测的设备和换能器及成像软件等均采用中航复合材料有限责任公司的 MUI-21 超声自动扫描检测系统及其 NLU 成像模块,通过超声换

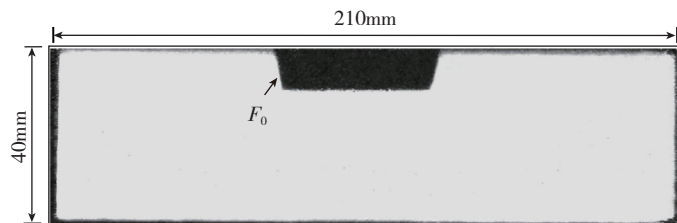


图5 正常扩散焊试件1的NLU成像检测结果

Fig.5 NLU imaging result of specimen 1 without defect

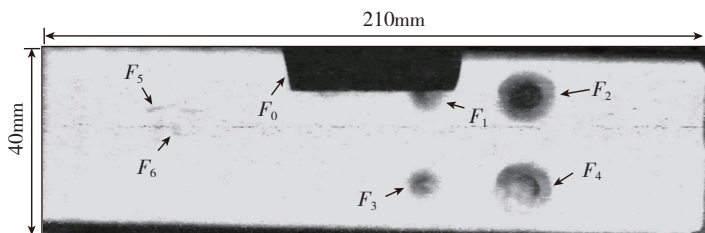


图6 含有扩散焊缺陷的试件2的NLU成像检测结果

Fig.6 NLU imaging result of specimen 2 with defect

灰度分布非常均匀,这是因为试件1内部的扩散焊接界面没有预置缺陷,其界面接连完好,而且,由于此时的扩散焊界面与母材的微结构一致,即在扩散焊接界面没有出现额外的非线性高阶谐波反射信号,此时, $T_w \approx 1$,由式(2)和式(6)可知,在其他条件一定时,NLU成像灰度主要取决于 $H_n(nf_1, \tau)$ 和 $P_T(f_2, t)$,而对于同一试件,在扫描成像过程中,每个检测点的 $H_n(nf_1, \tau)$ 和 $P_T(f_2, t)$ 相同,因而在图5中的灰度分布非常均匀,同时表明试件1内部扩散焊接界面没有缺陷。值得指出的是,通常用于扩散焊接的母材也是通过无损检测合格的材料,当检测结果表明其内部没有材料缺陷时,才用于扩散焊接零件的制造。

(3)在图5和图6中四周的黑色灰度分布对应试件的边沿以外的区域,当换能器扫描到试件边沿以外的区域,声波由试件中的传播变成耦合水柱中传播,此时声波传播时间分别为:

$$t_{\text{water}} = \frac{nL}{v_{\text{water}}} + t_0 \quad (7)$$

$$t_{\text{specimen}} = \frac{nL}{v_{\text{specimen}}} + t_0 \quad (8)$$

式中, t_0 为起始时间,扫描过程中是

固定不变的,由换能器与被检测零件表面之间的喷水距离确定; t_{water} 、 v_{water} 分别为声波在长度为 L 的水柱中的传播时间和声速; t_{specimen} 、 v_{specimen} 分别为声波在厚度为 L 的扩散焊试件中的传播时间和声速。通常 $v_{\text{specimen}} = (3 \sim 4)v_{\text{water}}$,由式(8)可知, t_{specimen} 会明显比 t_{water} 小得多,从而使直接来自水柱的声波落不到对应的 $H_n(nf_1, \tau)$ 窗口函数中,由式(6)可知,此时仍有 $U_{\text{rgb}}(f_2, t) \approx 0$,因此在图5和图6中对应试件四周的图像位置出现了黑色灰度分布区。

(4)在图6中除了出现 F_0 以外,还出现了 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 4个圆形黑色灰度区,其大小不同、分布位置也不同,分别对应试件2中扩散焊接界面的4个预置缺陷,缺陷显示非常清晰易判断。这是因为由式(4)可知,在缺陷区 $T_w = T_w(\Delta h, \Delta S, nf_1) < 1$,即此时 $P_T(f_2, t)$ 与扩散焊缺陷的紧贴程度 Δh 、缺陷区的焊合率 ΔS 等密切相关,由式(6)可知, $U_{\text{rgb}}(f_2, t)$ 会随着缺陷的特性变化,从而在图6中对应缺陷区位置的4个圆形黑色灰度区 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 的灰度比对应好区的灰度深,而比 F_0 和试件四周的灰度浅。

(5)在图6中除了出现 F_0 和 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 以外,其整体灰度分布均匀性不如图5中的灰度分布均匀性好,特别是在图6的中心部位还可以看到一些弥散分布的点状深灰色区,如黑色箭头所指示的深灰色区 F_5 、 F_6 ,其形状远不如 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 有规律,其分布也呈现较明显的随机性,这些灰度区应与扩散焊界面的缺陷有关,也可能是在缺陷模拟时,某些污染剂意外地少量扩散造成的,有待进一步验证分析。

结论

(1)分析结果表明,在厚板扩散焊中,缺陷的存在会使非线性高阶谐波明显改变,而且这种变化是高频谐波比低频谐波更明显,也与厚板扩散焊中缺陷紧贴、焊合率、分布特征等密切相关,基于此原理可以实现厚板扩散焊的无损检测;

(2)利用入射声波在厚板扩散焊中传播产生的非线性高阶谐波分量,通过构建非线性函数,可以有效地提取非线性高阶谐波信号,通过自动扫描方式,进而可以实现厚板扩散焊的NLU成像检测;

(3)试验结果表明,利用NLU成像结果,根据其灰度分布规律,可以非常清晰地进行扩散焊中紧贴性缺陷的识别和判别以及缺陷的定量分析,最大检测厚度可达70mm。因此,NLU成像方法为厚板扩散焊提供了一种非常有效的可视化检测方法和手段,目前已得到了较好的实际检测应用,取得了较好的实际检测效果。

参考文献

[1] 曲伸,李英,倪建成,等.航空发动机先进焊接技术应用[J].航空制造技术,2015(20):53-55.

QU Shen, LI Ying, NI Jiancheng, et al. Application of advanced welding technology in aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(20): 53-55.

(下转第48页)