

文章编号:1673-9981(2008)01-0034-05

## 搅拌摩擦焊焊缝缺陷的超声波动态波形分析\*

徐蒋明<sup>1</sup>, 柯黎明<sup>1</sup>, 邢丽<sup>1</sup>, 徐春容<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610005)

**摘要:**以铝合金搅拌摩擦焊焊缝的包铝陷入缺陷、隧道孔缺陷和未焊透缺陷为研究对象,通过超声波检测中的前后扫查和左右扫查获取缺陷的超声波回波动态波形,分别描述了三种缺陷的动态波形特点,并分析了各缺陷动态波形形成的原因.结果表明:三种缺陷的左右扫查的动态波形相似;隧道孔缺陷的前后扫查动态波形具有自身特征,而包铝陷入缺陷和未焊透缺陷的前后扫查动态波形具有光滑平面反射体的前后扫查的动态波形特征.

**关键词:**搅拌摩擦焊; 焊缝缺陷; 超声波检测; 缺陷动态波形; 无损检测

**中图分类号:** TG441.7

**文献标识码:** A

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, 简称FSW)是低熔点合金板材固相连接的一种新兴技术<sup>[1]</sup>.与传统的熔焊相比,FSW的焊接温度低于合金的熔点,避免了合金内易挥发性元素和低熔点元素的损失,接头内不易形成气孔和热裂纹等焊接缺陷<sup>[2]</sup>.随着FSW应用不断扩大,如何检测和评价FSW的焊缝质量,已成为无损检测领域中一个重要课题.相对于传统熔化焊,FSW的焊缝缺陷具有紧贴、细微、取向复杂的特点<sup>[4]</sup>,增加了缺陷无损检测的难度.目前,国外的FSW焊缝无损检测技术处于缺陷表征与检测方法探索、技术积累阶段<sup>[5]</sup>.

超声波技术是目前应用于FSW焊缝缺陷检测的一种较为理想的无损检测手段.超声波检测具有检测灵敏度高、缺陷定位准确等优点.超声波定性检测缺陷的方法有波形判别法、回波相位法、频谱分析法、超声C扫描法和缺陷回波小波分析法等<sup>[6]</sup>,其中波形判别法主要依靠不同缺陷所拥有的不同静态波形和动态波形特征来进行缺陷判定.静态波形指探头不动时缺陷波的高度、形状和密集程度,而动态波形是指探头在探测面上移动过程中,缺陷波的变

化情况<sup>[7]</sup>.波形判别法是工程实践中常用的方法,对焊缝缺陷的初步判定起着重要的作用.本文以FSW焊缝的隧道孔缺陷、未焊透缺陷和包铝陷入缺陷为对象,研究超声波动态波形的特点.

### 1 FSW焊缝缺陷的形成原因及其特点

隧道孔缺陷(Channel Defect)是被焊材料填充不完全时的缺陷.这是由于在焊接过程中热输入量不够导致金属塑化不足,从而使金属流动不充分所致(图1(a)).这种缺陷一般出现在搅拌针底部附近,呈片状或圆孔状,沿着焊缝长度方向连续分布.该缺陷具有机械缺陷的遗传效应<sup>[8]</sup>.

如果围绕搅拌针的流动搅拌未贯穿到整个焊缝厚度,也就是搅拌针下方的搅拌不充分,那么在焊缝根部就会形成与母材未完全结合或者弱结合的情况,从而产生未焊透缺陷(图1(b)).未焊透缺陷(Lack of Penetration, 简称LOP)沿着焊缝长度方向连续分布.

高强铝合金板材的上下表层通常用纯铝作保护

收稿日期:2007-11-12

\* 基金项目:航空科学基金资助项目(20061156003);无损检测技术教育部重点实验室基金资助项目(ZD200629005)

作者简介:徐蒋明(1981-),男,湖北荆门人,硕士研究生.

层,纯铝层被称为包铝层.在FSW过程中包铝层会陷入焊缝形成包铝陷入缺陷(图1(c)).这是由于焊接过程中搅拌头下压量过大,搅拌针的旋转将板材底部的包铝层卷入铝合金基体中,但卷入的包铝层又未被打碎及充分搅拌,使其在板材内部与铝合金

基体形成不均匀的弱结合面,该结合面会影响焊缝的拉伸强度.包铝陷入缺陷一般位于焊缝根部,且同隧道孔缺陷和未焊透缺陷一样具有机械缺陷的遗传效应.

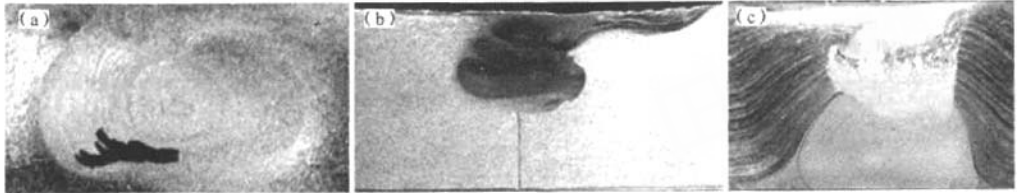


图1 FSW焊缝的三种缺陷

(a)隧道孔缺陷;(b)未焊透缺陷;(c)包铝缺陷

Fig. 1 Three types of defects in FSW joints

(a)channel defect;(b)lack of penetration;(c)aluminum clad defects

## 2 试样制备及检测方法

### 2.1 试样制备

采用FSW将2024铝合金板材试件对接焊以制备隧道孔缺陷和未焊透缺陷的试样,试件尺寸为 $200\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ .采用FSW将LC9铝合金板材试件对接焊以制备包铝陷入缺陷的试样,试件尺寸为 $200\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ .

在制备隧道孔缺陷试样的试验中,用轴肩直径15 mm、搅拌针长度3.8 mm的无螺纹搅拌头.在制备未焊透缺陷试样的试验中,用轴肩直径18 mm、探针长度3.2 mm的左旋螺纹搅拌头.在包铝陷入缺陷试样制备试验中,采用轴肩直径30 mm、探针长度9.7 mm的左旋螺纹搅拌头.各试样的焊接工艺参数列于表1.

表1 焊接工艺参数及缺陷种类

Table 1 Welding process parameters and type of defect

试样	搅拌头	搅拌头转速 $/(r\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $/(mm\cdot\text{min}^{-1})$	焊接压力	缺陷种类
Ac1	左螺纹	750	37.5	较大	包铝陷入
Ac2	左螺纹	950	37.5	较大	包铝陷入
Ch1	无螺纹	950	95	正常	隧道孔
Ch2	无螺纹	950	60	正常	隧道孔
Ch3	无螺纹	1180	60	正常	隧道孔
Lop1	左螺纹	1180	60	正常	未焊透
Lop2	左螺纹	1180	95	正常	未焊透
Lop3	左螺纹	950	60	正常	未焊透
Lop4	左螺纹	750	60	正常	未焊透

### 2.2 检测方法

用PXUT-27型超声波探伤仪,使用 $5\text{ P5}\times 10\text{ K2.5}$ 斜探头检测LOP缺陷和包铝陷入缺陷的动态波形,使用 $5\text{ P5}\times 6\text{ K3}$ 和 $5\text{ P5}\times 10\text{ K2.5}$ 斜探头检测隧道孔缺陷的动态波形.依照JB/T4730.3-2005

标准中的前后、左右两种扫查方式,测定缺陷的动态波形.在扫查时探头每移动2 mm记录一次缺陷回波的增益值.以探头移动的距离作为横坐标,波高作为纵坐标,绘制动态波形曲线.

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 包铝陷入缺陷的动态波形

在焊缝试样 Ac1 和 Ac2 上分别取两个不同的位置进行扫查,扫查位置的编号分别为 Ac11, Ac12, Ac21 和 Ac22.

图 2 为包铝陷入缺陷的前后扫查动态波形.从图 2 可见,四个不同位置的动态波形大致相同.随着探头从焊缝边沿、垂直于焊缝向远离焊缝方向移动,首先缺陷波幅较平滑地由低点上升到峰值,然后波幅保持基本不变或只在很小范围内变化,最后波幅又平滑地下降到最低点.包铝陷入缺陷的前后扫查的动态波形具有 JB/T4730. 3-2005 标准中光滑平面反射体前后扫查动态波形的特征.

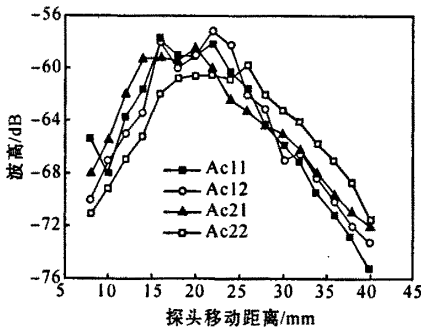


图 2 包铝陷入缺陷的前后扫查动态波形

Fig. 2 Dynamic echo waveforms of aluminum clad defects by traversing scan

图 3 为包铝陷入缺陷的左右扫查动态波形.从图 3 可以看出,除了由于包铝陷入缺陷大小不同所导致的缺陷回波幅值的大小不同外,这四个动态波形具有共同的特征,即在探头左右移动的过程中,缺陷反射波幅值基本保持不变或在不超过 4 dB 的范围内变化.这说明包铝陷入缺陷是沿焊缝长度方向延伸的.实践中可用左右扫查来帮助判断缺陷的延伸长度.

图 4 为包铝陷入缺陷的界面分布示意图.由于搅拌摩擦焊接导致的包铝层卷入铝合金基体中,使得在焊缝内部形成了纯铝/铝合金界面 S,按照超声波垂直入射到界面时的反射和透射理论,要想在界面获得较大的反射回波,必须有较大的声压反射率  $r$ ,其表达式为<sup>[7]</sup>:

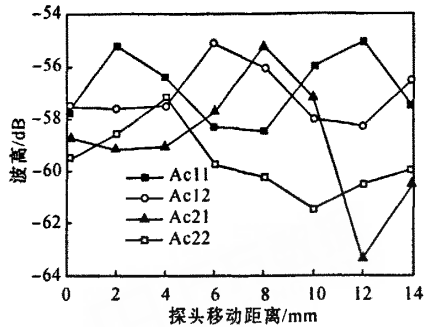


图 3 包铝陷入缺陷的左右扫查动态波形

Fig. 3 Dynamic echo waveforms of aluminum clad defects by lateral scan

$$r = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \tag{1}$$

式(1)中: $z_2$  为第一种介质的声阻抗, $z_1$  为第二种介质的声阻抗.

由式(1)可知,只有界面两侧材料的声阻抗相差较大时才会有较大的反射波.试验中被焊板材的铝合金基体为 LC9,那么 S 界面即为 LC9/纯铝界面.由于 LC9 和纯铝的声阻抗差异非常小,即界面 S 的声压反射率  $r$  非常小,因此,对于结合良好的界面 S 基本上无界面回波.在试验中发现,在界面 S 的 A 范围内始终有较大的反射波.这说明界面两侧的材料连接不好,这种缺陷波产生的原理类似于声阻抗相近的复合材料超声波探伤的原理,不是界面本身导致了反射波,而是界面存在较严重的脱接而产生的缺陷回波.

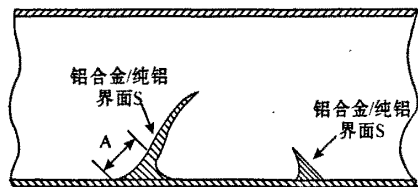


图 4 包铝陷入缺陷的界面分布示意图

Fig. 4 Distribution of interface of aluminum clad defect

#### 3.2 隧道孔缺陷的动态波形

图 5 为 5P5×10K2.5 探头前后扫查隧道孔缺陷时的超声动态波形,图 6 为隧道孔缺陷一次波、二次波检测示意图.从图 5 可见,当 5P5×10K2.5 探头在焊缝边沿时,隧道孔缺陷的反射波高最大,出现第一个回波峰值;随着探头从焊缝边沿向远离焊缝方向

移动,回波波高开始急剧下降直到最低点;随着探头的继续移动,回波波高又开始平滑地上升到第二个峰值,第二个回波峰值没有第一个回波峰值大,接着回波波高又平滑地下降.从第一个回波峰值到第一次最低点的反射回波是超声波一次波所检测到的,即对应于图6所示的探头移动范围P;而从第一次回波最低点到第二次回波峰值以及峰值后的回波下降部分,则是超声波二次波探伤检测到的,即对应于图6所示的探头移动范围Q.动态波形中第二次峰值比第一次峰值低的主要原因是第二次峰值所对应的回波为二次波探伤的回波,它的声程相对于第一次峰值的回波所对应的一次波声程更长,回波衰减大.

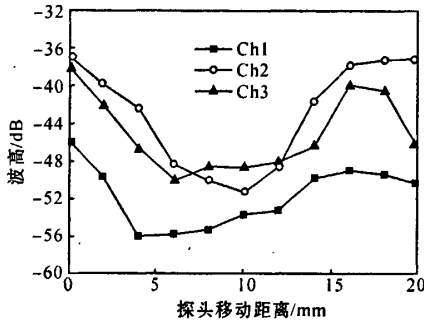


图5 5P5×10K2.5探头隧道孔缺陷的前后扫查动态波形  
Fig.5 Dynamic echo waveforms of channel defects by traversing scan with 5P5×10K2.5 ultrasonic transducer

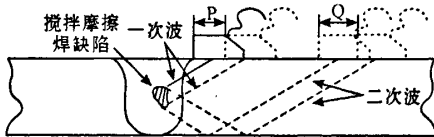


图6 搅拌摩擦焊隧道孔缺陷一次波、二次波检测示意图  
Fig.6 Schematics of inspection for defects of FSW with single traverse technique and double traverse technique

图7为5P5×6K3探头前后扫查隧道孔缺陷时的动态波形.图7与图5的波形不同之处在于,在第一次峰值之前,图7相对于图5的波形多了一个急剧上升的阶段,这是由于在同样条件下大K值探头能检测到靠近焊缝的更广的表面区域(图8).

由于FSW焊缝缺陷有沿焊缝长度方向延伸的特点,因此隧道孔缺陷的左右扫查动态波形与包铝陷入缺陷的左右扫查的动态波形有类似的特征.

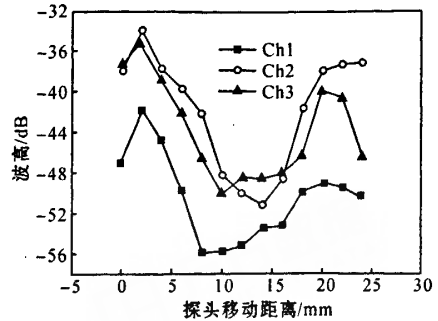


图7 5P5×6K3探头隧道孔缺陷的前后扫查动态波形  
Fig.7 Dynamic echo waveforms of channel defects by traversing scan with 5P5×6K3 ultrasonic transducer

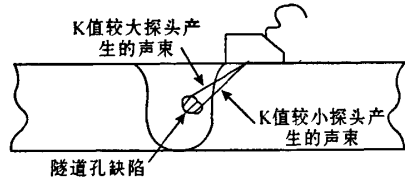


图8 不同K值探头所能探测到的最大区域比较示意图  
Fig.8 Comparison of maximum extent of inspection with different K value ultrasonic transducers

3.3 未焊透缺陷动态波形

图9为未焊透缺陷的前后扫查动态波形.从图9可以看出,未焊透缺陷的前后扫查动态波形与包铝陷入缺陷的动态波形十分相似,同样有光滑平面反射体前后扫查动态波形的特征.

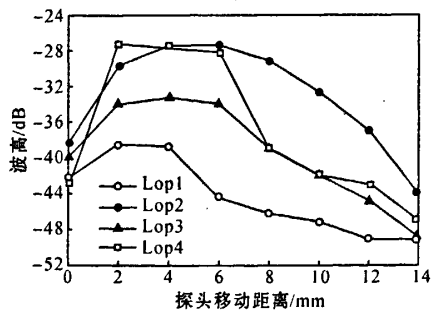


图9 未焊透缺陷的前后扫查动态波形  
Fig.9 Dynamic echo waveforms of LOP by traversing scan

由于未焊透缺陷与前两种缺陷一样有着沿焊缝长度方向延伸的特点,因此,其左右扫查的动态波形与另两种缺陷基本相同.

## 4 结论

(1) 由于包铝陷入、隧道孔和未焊透这三种搅拌摩擦焊缺陷的左右扫查的动态波形类似, 所以不能用此波形来判断和区分缺陷的种类。

(2) 隧道孔缺陷的前后扫查动态波形有较明显的自身特征, 可以与包铝陷入、未焊透缺陷的前后扫查的动态波形区分开来。因此, 前后扫查动态波形可以作为判别隧道孔缺陷的依据之一。

(3) 由于包铝陷入缺陷和未焊透缺陷都处于焊缝的底部, 且两者的前后扫查动态波形又十分类似, 所以需要辅助以其他手段来区分这两种缺陷并对其进行定性。

### 参考文献:

[1] KINCHEN D G, ALDAHIR E. NDE of friction stir

welds in aerospace applications[R]. New Orleans: Lockheed Martin Michoud Space Systems, 2002:1-7.

[3] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势[J]. 焊接, 2004(6):6-10.

[4] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 铝合金搅拌摩擦焊缝的无损检测方法[J]. 航空制造技术, 2006(3):81-84.

[5] BIRD C. Quality control of friction stir welds by the application of non-destructive testing[C]// 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Part City: [出版者不详], 2003.

[6] 夏纪真. 超声检测技术中的缺陷定性方法[EB/OL]. (2000-10-10) [2007-9-1] <http://www.ndtinfo.net/hichina/wenxian/xjz-wenku/xjz-ur-dingxing.htm>.

[7] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤(Ⅱ、Ⅲ级教材)[M]. 北京: 中国锅炉压力容器安全杂志社, 1995.

[8] 王训宏, 王快社, 杨日胜. 搅拌摩擦焊接头超声无损检测研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(7):62-64.

## Investigation on defect dynamic echo waveform of friction stir welding

XU Jiang-ming<sup>1</sup>, KE Li-ming<sup>1</sup>, XING Li<sup>1</sup>, XU Chun-rong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005, China)

**Abstract:** This paper regards aluminum clad defect, channel defect and lack of penetration (LOP) of friction stir weld (FSW) as the research object. The defects dynamic echo waveforms were acquired by traversing scan and lateral scan of ultrasonic testing. The characteristics of the defects dynamic echo waveforms were described. The formation reasons of the defects dynamic echo waveforms were analyzed. The results show that the generation of the ultrasonic echo wave from the aluminum clad defect was resulted from the weak-bonding of the interface between the aluminum clad and aluminum alloy because of almost same acoustic impedance of the both sides at the interface. Based on the characteristics of the defects dynamic echo waveforms that were acquired by traversing scan, channel defect can be distinguished from aluminum clad defect and LOP. Therefore, the characteristics can provide a thereunder for the preliminary qualitative analysis of the ultrasonic testing for FSW.

**Key words:** friction stir weld; weld defects; ultrasonic testing; defect dynamic echo waveform; nondestructive testing