

# 非线性超声脉冲反转法在铝合金焊缝疲劳寿命预测中的应用

万楚豪, 刚铁, 刘斌

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:**以不同疲劳寿命的铝合金焊缝为例研究了疲劳过程中的超声波非线性效应,同时建立了非线性参数与疲劳寿命的关系曲线(S-N曲线).采用脉冲反转法对非线性超声信号进行处理.结果表明,经过脉冲反转法获得的S-N曲线与经过滤波模块获得的S-N曲线相比谐波幅值提高了一倍,所以脉冲反转法可以提高非线性超声检测法表征疲劳损伤程度能力,而S-N曲线在疲劳过程中呈先缓慢增长后快速增长,最后下降的趋势,此趋势对应了材料疲劳的3个阶段,而金相组织验证了曲线的准确性,所以通过非线性超声脉冲反转法来预测疲劳寿命是可行的.

**关键词:**非线性超声; 脉冲反转法; 铝合金焊缝; 疲劳寿命预测

中图分类号: TG 405 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)02-0027-04

## 0 序言

大量的统计资料表明,在各种机械断裂事故中,90%以上是由疲劳损伤引起的.焊接过程具有多种不稳定因素,焊接区域存在缺陷难于避免,而焊接缺陷必然引起局部应力集中,基于焊接结构的特殊性,疲劳往往是从焊接接头处产生<sup>[1-3]</sup>.因此焊接接头的疲劳损伤评估是焊接领域中的一个重要研究课题.

材料的疲劳断裂主要经过3个阶段,即裂纹萌生、裂纹稳定扩展和失稳断裂.而对于疲劳损伤评价及寿命的预测,无论是理论预测法还是试验预测法,应用于实际部件疲劳预测时都存在一定的局限性.目前非线性超声检测方法对疲劳损伤早期性能退化及疲劳微裂纹的评价表现出比较明显的优势.近几十年来,国内外的学者在材料力学性能的退化<sup>[4-6]</sup>、微裂纹<sup>[7]</sup>、粘接接头质量<sup>[8,9]</sup>和搅拌摩擦焊接质量等领域开展了广泛的非线性超声检测研究工作,但熔焊焊接接头疲劳损伤的检测与评价方面开展的研究目前还很少.

试验在分析非线性超声无损检测信号特点的基础上,将脉冲反转法应用于非线性超声无损检测的信号处理,简化了非线性测试系统,提高了高次谐波

的采集效率,同时通过对铝合金焊缝疲劳试样的检测结果分析,得出了超声波非线性参数与铝合金焊缝疲劳寿命之间的关系曲线,最后通过金相组织验证了试验结果.

## 1 试样制备及测试系统

### 1.1 试样选择

试验材料选用6061铝合金,焊接方法为填丝TIG焊,采用多层多道对接焊接铝合金板,焊丝牌号为ER5356,坡口为X形,坡口角度为60°.图1为焊缝的坡口形状.

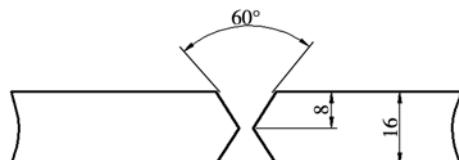


图1 焊缝坡口形式(mm)  
Fig. 1 Groove shapes of welded plate

为确保疲劳试样中不存在宏观焊接缺陷,采用X射线与超声衍射时差法(time of flight diffraction, TOFD)对6061铝合金的焊缝区域进行了检测.图2a为实际焊缝形貌.从图2b射线数字图片可以看到,焊缝中有两处明显的夹钨,从图2c TOFD检测图像中看出,焊缝中不存在裂纹等明显缺陷.结合

射线和超声 TOFD 图像,排除焊缝中含缺陷的位置,试验将不存在焊接缺陷的位置加工成疲劳试样.

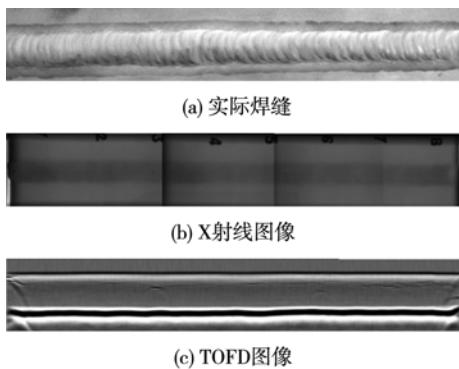


图2 实际焊缝和X射线及TOFD图像

Fig. 2 Actual welding seam, X-ray and TOFD image

## 1.2 试样尺寸及疲劳试验

为了方便采用引伸计对疲劳试样中裂纹进行观测以及明确超声波检测区域,在试样中心切割出一个燕尾状缺口,如图3所示. 疲劳试验在PLG-1000高频疲劳试验机上进行,疲劳类型为高频高周疲劳,疲劳试验中加载力为4 kN,应力比为-0.1,加载频率为90 Hz,加载次数为 $1.5 \times 10^6, 3.0 \times 10^6, 4.5 \times 10^6, 6.0 \times 10^6, 7.5 \times 10^6, 9.0 \times 10^6, 1.05 \times 10^7, 1.20 \times 10^7$ 周次.

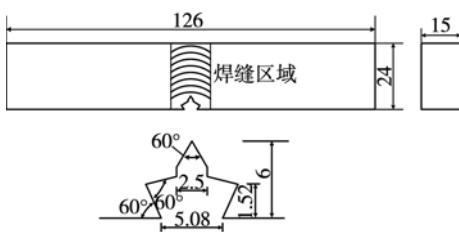


图3 试样尺寸 (mm)

Fig. 3 Size of sample

## 1.3 非线性检测系统

用于检测非线性效应的试验设备为美国 RITEC 公司生产的 RAM-5000-SNAP 非线性高能超声测试系统,检测系统示意图如图4所示. 试验中选取压电陶瓷晶片作为换能器,使用 AB 胶将压电陶瓷晶片粘结在设计好的有机玻璃楔块上. 当提取基波信号时,激励换能器和接收换能器中心频率均为 2 MHz,当提取谐波信号时,激励换能器中心频率为 2 MHz,接收换能器中心频率为 4 MHz. 试验采用倾斜入射法测量材料中的超声非线性系数. 楔块材料为有机玻璃,选用甘油作为试验用耦合剂.

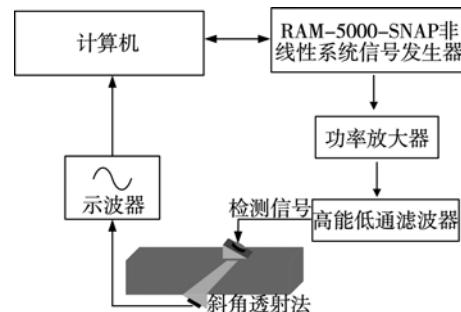


图4 超声非线性测试系统示意图

Fig. 4 Test setup

## 2 超声非线性系数与脉冲反转技术

### 2.1 超声非线性系数

传统无损检测技术使用的超声波幅值较小,超声波传播引起的应力和应变均很小,超声波的传播遵循线性应力-应变关系. 但当高幅度的超声波激励时,超声波与介质及缺陷的应变-应力非线性增强,此时线性波动方程便不再成立.

当超声波在各向同性固体中传播时,其波动方程的二级近似解为

$$u(x, t) = A_1 \sin(\omega t - kx) + \frac{1}{8} (A_1^2 k^2 \beta x) \cos 2(\omega t - kx) \quad (1)$$

式中: $A_1$  为基波幅值;  $\omega$  为频率;  $t$  为传播时间;  $k$  为波数;  $x$  为传播距离;  $\beta$  为非线性系数. 从式(1)可以看出,二次谐波幅值  $A_2$  可以表示为

$$A_2 = \frac{1}{8} (A_1^2 k^2 \beta x) \quad (2)$$

对相同尺寸的试样,波数  $k$  和传播距离  $x$  为常数,所以非线性系数可以用基波幅值  $A_1$  和二次谐波幅值  $A_2$  来表示. 采用非线性参数  $S$  代替  $\beta$  表征非线性效应,定义为

$$S = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (3)$$

### 2.2 脉冲反转技术

当发射信号的初始相位为 0° 时,波动方程的二阶近似解可以表示为

$$u(x, t) = A_1 \sin(\omega t - kx) + A_2 \cos 2(\omega t - kx) \quad (4)$$

当发射信号的初始相位为 180° 时,此时波动方程的二阶近似解为

$$\begin{aligned} u(x, t) &= A_1 \sin(\omega t - kx + \pi) + A_2 \cos 2(\omega t - kx + \pi) \\ &= -A_1 \sin(\omega t - kx) + A_2 \cos 2(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)求和,则基波项相互抵消,而二次谐波项将变为原来的两倍. 所以在不使用滤波模块非线性超声检测中,可以采用脉冲反转法对超

声波信号进行滤波,从而得到二次谐波的幅值。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 常规非线性超声检测结果

为了减少仪器和随机因素产生的谐波干扰,取试样在波传播方向所能容纳的不与接收信号重叠的最大周期数作为正弦脉冲串信号的周期数,根据超声波传播的距离和波速,试验选用的激励波周期数为4。基波信号提取时,发射探头和接收探头均为2 MHz,探头接收到的信号不经过高通滤波器直接回到主系统,二次谐波信号提取时,2 MHz探头为发射探头,4 MHz探头作为接收探头,探头接收到的信号经过滤波器回到主系统。图5为试验中接收的基波与二次谐波的时域以及频域信号,从图5a接收到的时域信号可以看出,二次谐波信号发生了畸变,不再是单一的正弦波形状。从FFT变换后频谱图可以看出,图5a中的畸变信号是基频信号与高频信号组成的,同时在图5频谱图中可以直接读取基波与二次谐波信号幅值 $A_1$ 与 $A_2$ 。将测得的基波信号幅值 $A_1$ 和二次谐波信号幅值 $A_2$ 按照式(3)计算可得到表征材料疲劳损伤的非线性参数 $S$ 。

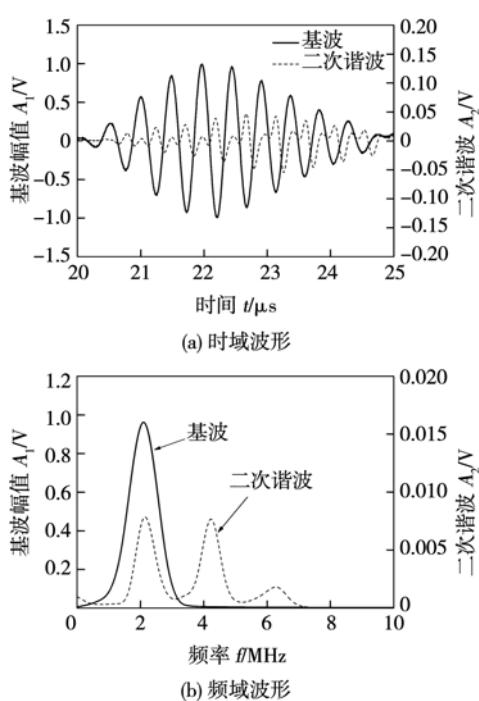


图5 基波与谐波信号的时域与频域

Fig. 5 Waveform and spectrum of fundamental wave and second harmonic wave

#### 3.2 基于脉冲反转法的非线性信号提取

使用脉冲反转法后非线性超声系统将不使用高

通滤波器,分别激励0°相位和180°相位的2 MHz信号,采用4 MHz换能器进行信号接收。图6为脉冲反转法信号处理过程,其中二次谐波接收信号如图6a所示,图6b为非线性信号的频域。依照脉冲反转法将两个相差180°的A信号进行叠加处理,信号相加前,两个A信号扣除了0.25 μs的时间差。经过反转叠加后发现接收信号已经无畸变现象发生,可以认为是一个纯净的单频信号,如图6c所示。经过FFT变换,发现此时只有4 MHz的信号,如图6d所示。此时基波信号能量基本被抵消,而二次谐波信号幅值约为原来的两倍。试验结果显示脉冲反转法具有滤波的功能,但与机械滤波不同的是,脉冲反转法处理后的二次谐波信号能量将加倍,而单纯滤波后信号能量是降低的,这在评价疲劳损伤程度中具有重要的意义。

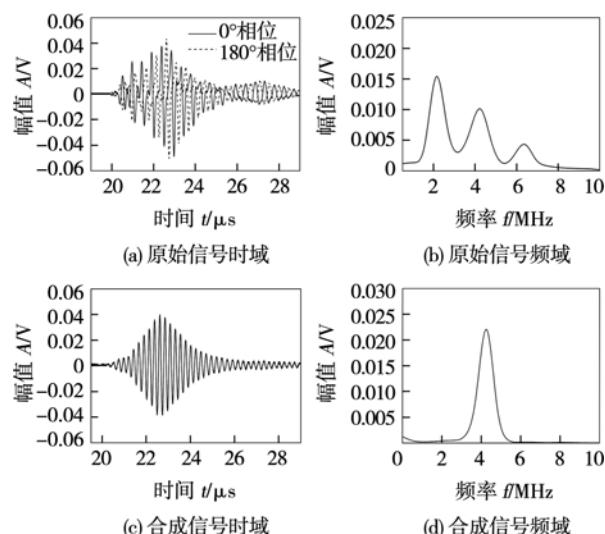


图6 原始信号及合成信号的时域和频域

Fig. 6 Waveform and spectrum of original signal and composite signal

#### 3.3 超声非线性法在铝合金焊缝疲劳寿命预测中的应用

试验采用非线性参数来表征疲劳损伤的程度。图7为不同疲劳寿命的铝合金焊接接头I类疲劳试样非线性系数的变化曲线,从图7a可以发现非线性系数呈先增长后降低的变化趋势,当疲劳寿命达到 $7.5 \times 10^6$ 周次时,非线性参数达到峰值,经分析后判断此材料内部应有微裂纹形成,可以认为非线性参数升高的这一过程便是微裂纹的萌生过程,当疲劳程度继续加大时,非线性参数又开始变小。脉冲反转技术应用到疲劳损伤的评价中的变化规律如图7b所示,发现非线性效应的整体变化规律不变,说明采用脉冲反转法也可以在不采用滤波模块的情

况下对焊缝的疲劳损伤程度进行检测。

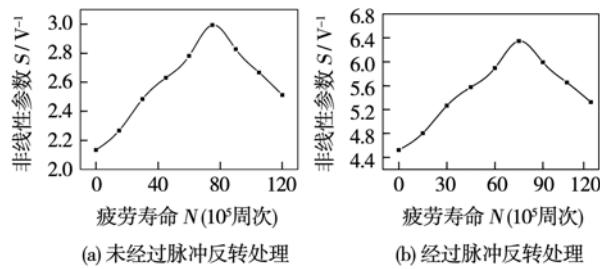


图7 非线性参数与疲劳寿命的关系

Fig. 7 Relationship between nonlinear parameter and fatigue cycles

非线性参数表征的是材料内部局部特征,而试样疲劳早期特征为位错及孪晶的形成,同时位错的数量影响非线性参数的大小,所以疲劳初期的非线性参数会呈现随位错数量增加升高的趋势。裂纹是一个局部缺陷,它的形成过程对非线性参数的变化影响较大,而在疲劳裂纹的萌生阶段,疲劳试样内部形成的裂纹应为微裂纹,高能量超声波通过微裂纹时,微裂纹界面在超声波作用下裂纹面的碰撞被认为是非线性参数升高的另一原因,而裂纹对非线性参数的影响要大于位错,所以在宏观裂纹出现前,非线性参数都会呈增长趋势。伴随着疲劳寿命的增加,微裂纹扩展为宏观裂纹,此时材料的衰减系数显著增大,由于声波的衰减与频率的平方成正比,二次谐波的峰值衰减远大于基波,这便造成非线性参数在疲劳后期反而会变小。该推断可从金相组织中得到论证。当宏观裂纹出现后,材料已进入疲劳末期,随时将会发生断裂,所以在非线性参数达到峰值时,便可认为材料已达到疲劳寿命的极限,这对材料疲劳寿命的预测有很大意义。为了进一步验证试验结果,对试样缺口处进行破坏,观察缺口处金相组织情况。

### 3.4 金相组织分析

从疲劳试样开口处切割下小块试样,观察金相组织,图8为放大100倍时的金相组织形貌。从图8a中可以看出,疲劳在 $4.5 \times 10^6$ 周次之前未产生裂纹; $6.0 \times 10^6$ 周次时开始产生裂纹,此时裂纹非常细小,不易被观察到;从图8b中可以看出, $7.5 \times 10^6$ 周次时裂纹间距小于 $3 \mu\text{m}$ ,属于闭合裂纹,此时产生的非线性效应最为明显;随着疲劳程度增加,裂纹不断扩张,从图8c中可以看到 $1.05 \times 10^7$ 周次时,裂纹间距已扩展很大,裂纹属于宏观裂纹,此时非线性效应减弱。金相组织充分验证了非线性参数预测铝合金焊缝疲劳寿命的准确性。

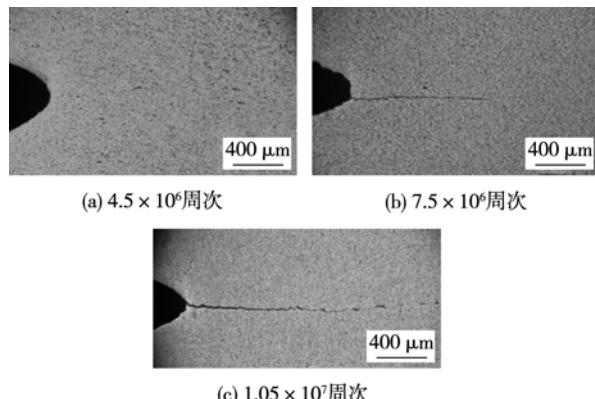


图8 疲劳试样金相组织形貌

Fig. 8 Metallographic organization of fatigue specimen

## 4 结 论

(1) 将脉冲反转法应用到非线性信号的处理之中,试验结果证明脉冲反转法起到了滤波的作用,简化了非线性试验的操作系统,同时脉冲反转法处理后二次谐波信号能量将加倍。

(2) 通过理论分析以及检测试验建立了非线性参数与疲劳寿命之间的关系曲线(S-N),曲线呈现先增加后减小的变化规律。

(3) 金相组织解释了非线性参数的变化规律,所以将非线性参数可以作为参照值,用来表征焊缝的疲劳寿命。

## 参考文献:

- [1] 李向伟,兆文忠,郑成德. 基于质量模糊评判模型的焊缝疲劳寿命评估[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 49-52.  
Li Xiangwei, Zhao Wenzhong, Zheng Chengde. Weld fatigue life assessment based on fuzzy quality evaluation model [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 49-52.
- [2] 刘雪松,李书齐,王萍,等. 6N01-T5铝合金焊接接头疲劳断裂分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 25-28.  
Liu Xuesong, Li Shuqi, Wang Ping, et al. Fatigue failure analysis of 6N01-T5 aluminum alloy welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(10): 25-28.
- [3] 朱荣华,刚铁. 铝合金疲劳裂纹扩展声发射监测[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 29-32.  
Zhu Ronghua, Gang Tie, Fatigue crack propagation of aluminum alloy based on acoustic emission monitoring [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 29-32.
- [4] Jhang K Y. Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation[J]. Ieee Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2000, 47(3): 540-548.
- [5] Nagy P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1): 375-381.

[下转第34页]