

薄板焊缝中超声 TOFD 检测方法浅析

Review of Ultrasonic TOFD Method for Thin Welds

南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 陶京新 卢超
中航复合材料有限责任公司 刘松平

[摘要] 回顾了超声 TOFD 检测方法,分析了超声 TOFD 近表面盲区的形成原因和 3 种改善近表面检测盲区的方法,包括 TOFDW、S-TOFD 以及基于希尔伯特黄变换的缺陷信号处理方法,并进行了典型的检测试验分析。利用 TOFDW 方法,TOFD 表面检测盲区可达 2mm。

关键词: 超声检测 TOFD 焊缝

[ABSTRACT] The ultrasonic TOFD (time-of-flight diffraction) method is reviewed, then the reasons of dead zone nearby surface is analyzed. Three methods including TOFDW, S-TOFD and signal processing based on Hilbert-Huang transform are introduced. Furthermore, practical experimental results are presented and analysed. TOFD dead zone can be reduced to 2mm near upper surface by TOFDW.

Keywords: Ultrasonic detection TOFD Welding

传统的超声检测主要是基于入射声波在缺陷周围形成的反射、折射以及透射行为产生的声波信号规律进行缺陷评估,这种检测方法对于与垂直于入射面的缺陷(例如焊缝中的裂纹)难以检出和定量评估。正是由于这个原因,在 20 世纪 70 年代,英国 AEA 无损检测中心的 Silk M.G 首先提出了一种利用缺陷产生的衍射波对缺陷进行定量的检测方法^[1],被称作脉冲时差衍射法(Time-of-Flight Diffraction, TOFD)。通过裂纹端点产生的衍射波的时间,不受缺陷取向的限制,可以更为准确地计算出裂纹的高度、深度等信息。1985 年英国将 TOFD 技术应用于核反应堆压力容器的检测当中,随后 TOFD 被广泛应用于核电、化工、石油、铁路、电力、桥梁和压力容器等工程检测中。1993 年英国出台了世界上第一部 TOFD 标准(BS 7706-1993)^[2],美国、欧盟、日本也相继颁布了所在地区的 TOFD 标准^[3]。ASME 标准提到利用 TOFD 代替射线检测,这对节约检测成本、提高生产效率以及保护检测人员身体健康方面都有着积极意义。2010 年,我国出台了承压设备的 TOFD 标准 JB/T 4730.10,主要适用于厚度 12mm 以上焊缝检测,而对于薄板焊缝的检测,由于超声 TOFD 具有近表面盲区的

局限性,难以对缺陷进行准确的定量及定位,因此,研究对薄板焊缝中近表面缺陷的 TOFD 检测方法具有实际意义。

1 超声 TOFD 检测方法

1.1 基本原理

当超声波在传播过程中遇到裂纹状缺陷时,会发生反射、波形转换、衍射。根据惠更斯原理,裂纹尖端可理解为二次点源再激发宽声束角声波能量,衍射波可以通过合适的位置被探头接收,这种基于衍射波对缺陷进行检测并且通过声波传播时间为判断缺陷依据的方法被称为衍射时差法。基本原理图和探头位置如图 1 所示^[4],其中路径①为直通波,在试件表面下进行传播;②③分别为上下端点产生的衍射波;④为底面反射波。示意图中只考虑纵波的传播。其典型 A 显示波形信号如图 2 所示^[4]。利用平行扫查和偏置非平行扫查方式,缺陷深度可由(1)式和(2)式确定,通过信号处理,可以用灰度图来对试件进行 B 和 D 扫描成像。

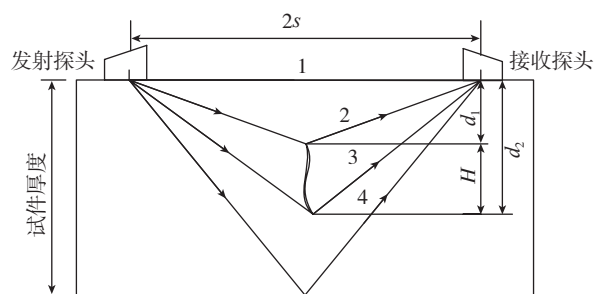


图1 超声TOFD原理

Fig.1 Principle of ultrasonic TOFD

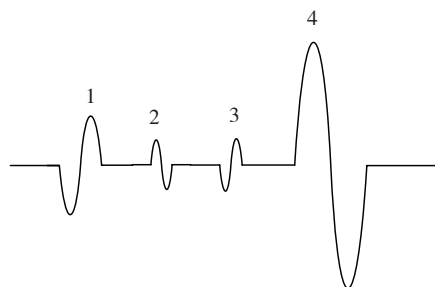


图2 典型TOFD的A显示信号示意图

Fig.2 Schematic of TOFDW method

$$d_1 = \frac{1}{2} \sqrt{t_1^2 v_L^2 - 4t_1 v_L S}, \quad (1)$$

$$d_2 = \frac{1}{2} \sqrt{t_2^2 v_L^2 - 4t_2 v_L S}, \quad (2)$$

$$H = d_2 - d_1, \quad (3)$$

其中, v_L 为试件材料的纵波声速; S 为发射探头与接收探头间距的 1/2; t_1 、 t_2 为分别为缺陷上、下端点衍射纵波的传播时间。

1.2 TOFD 的盲区问题

TOFD 在薄板焊缝检测中经常遇到表面盲区的影响,表面盲区是由直通波和底波的脉冲宽度造成的,在实际检测过程中,如果试件厚度较薄(厚度小于 10mm)或者缺陷位于盲区范围内(大约近表面 5mm 内),缺陷波就容易与直通波或底波发生混叠,从而无法直观地对缺陷进行定量定位,这是 TOFD 在薄板焊缝应用时必须考虑的问题。上表面盲区可近似通过式(4)表示。

$$D_{\perp} = [v_L^2 (\frac{t_L + t_p}{4})^2 - S^2]^{1/2}, \quad (4)$$

这里, t_L 为直通波持续时间, t_p 为直通波脉冲长度。

为了改善上表面盲区,通常有以下几种方法:

- (1) 减小探头中心距,提高时间分辨率。
- (2) 增大探头的角度,增大声束的覆盖范围。
- (3) 提高探头的中心频率,减小单个脉冲宽度,从而减小脉冲长度 t_p 。

然而,余高的影响使得探头中心距不能小于焊缝宽度,同时,侧向波的幅度变强,回波宽度增加,反而会影响系统的分辨力。增大探头角度易产生表面波,探头频率增大会带来声压衰减,同时声束覆盖范围也会减小。所以,需要综合考虑。

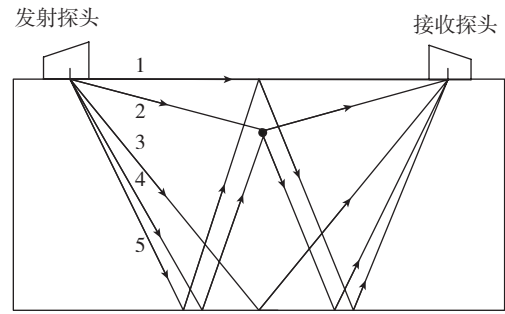
一般情况下表面盲区要比上表面盲区小。

2 改善超声 TOFD 表面检测盲区的几种方法

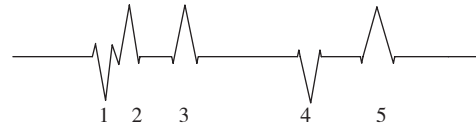
2.1 TOFDW 方法

与传统 TOFD 声束直接入射在缺陷产生衍射波不同,TOFDW 基于声波在试件底面产生的反射波对缺陷进行检测,如图 3 (a) 所示,其传播路径类似于 'W' 型反射,故把这种检测方法记作 TOFDW^[5-6]。

这样,直通波和底波相对于近表面缺陷产生的衍射波之间的时间轴上距离将增大,从而避免了波形混叠的干扰现象。同时,近表面区域也可以得到声场的覆盖,摆脱了探头声束宽度的限制。如图 3 (b)^[5] 所示,在试件中有 5 条纵波传播的路径,其中路径 1 是直通波,路径 2 是纵波直接入射在缺陷上产生的衍射波,当缺陷为近表面缺陷时,路径 2 将会与路径 1 的发生波形重叠,路径 3 是发生一次反射的底面回波,路径 5 是声束与试件上下面发生 'W' 型反射的回波,路径 4 是缺陷回波,



(a) 检测原理



(b) 典型 A- 显示信号特征

图3 TOFDW方法原理

Fig.3 Principle of TOFDW method

首先与底面发生一次反射,再经过缺陷产生衍射波,最后通过一次底面反射后达到接收探头,波形出现的位置如图 3 (b) 所示。

如图 4 所示,缺陷的投影距离可表示为:

$$d' = \frac{1}{2} \sqrt{(t_D v_L)^2 + 4t_D v_L S}, \quad (5)$$

$$\text{实际深度: } d = 2T - d', \quad (6)$$

其中, t_D 为缺陷波与直通波之间的时间差; T 为试件厚度。

TOFDW 方法主要应用于近表面缺陷的检测,通过在铝板上加工出长 15mm 宽 0.2mm 距上表面 1mm 的电子束焊缺陷面,其缺陷埋深测量结果误差在 0.3mm 以内。同时,使用 TOFDW 方法对焊缝进行了检测,试验证明对于实际深度为 2mm 的缺陷,测量误差在 0.5mm 以内。

以上所提到的声波传播均只表示纵波的单一声程

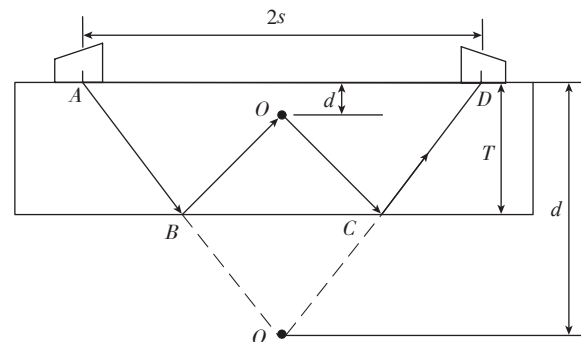


图4 TOFDW方法中缺陷位置计算方法示意图

Fig.4 Calculation method of flaw location based on TOFDW method

路径,实际上,由于入射纵波和横波的波形转换,工件内的波形成分复杂。Ido 等人^[7]提出了类似的方法(one-skip TOFD),试件内发生波形的转换如图 5 所示。为了防止变形横波成分的干扰,探头间距至少是试件厚度的 4 倍,这样三次反射纵波(即图 5 中 LLLL 波)才会出现在变形横波(LS 波)之前。由于 TOFDW 声程要比传统 TOFD 长,往往使用较高的系统增益值,这使得高频声噪明显增加,加上近表面缺陷的声波声强较声束中心线上的强度弱,这使得缺陷波幅值降低,尽管 TOFD 并不是以声波幅值为判断缺陷大小的依据,但仍需要声波幅值比噪声大以使波形位置可辨,通过小波变换降噪后的信号强度增大 1 倍。

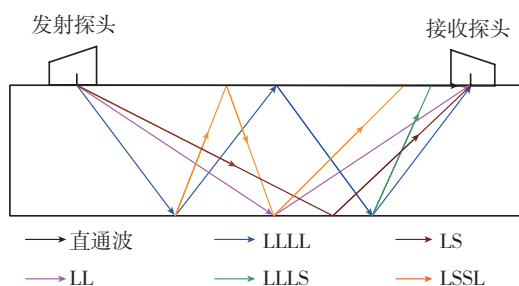


图5 试件内发生波形转换示意图
Fig.5 Wave modes convert in specimen

2.2 横波 TOFD (S-TOFD)

G.Baskam 等人提出了一种利用缺陷产生的衍射横波对缺陷进行定量的 TOFD 检测方法^[8-10],同时,为解决可能出现的波形混叠问题引入了隐藏信号识别技术(Embedded Signal Identification Technique,ESIT)。

当开口裂纹深度小于试件厚度的 2/3 时,底面发射回波将在衍射横波之前出现。当裂纹埋藏在试件内部时,裂纹的上下两端均会产生衍射横波。随着试件厚度的减小,直通波与纵波底面回波(L-L)之间的距离减小,致使缺陷纵波发生波形重叠,但使用衍射横波进行定量便可在一定程度上避免这个问题,因为 L-L 底波与变形横波(S-L/L-S)底波之间参考时间更长,检测窗口变大。

假设缺陷方向垂直于试件扫查表面且位于 2 个探头中间线上,则缺陷深度:

$$d = \sqrt{\frac{v_L^2 t_1^2}{(n+1)^2} - S^2}, \quad (7)$$

缺陷高度:

$$H = \sqrt{\frac{v_L^2 t_2^2}{(n+1)^2} - S^2 - d}, \quad (8)$$

其中, $n = \frac{v_L}{v_S}$, v_S 为试件中横波声速。

随着试件中的表面缺陷本身长度的增加,衍射横波

会向 L-S 底波靠拢甚至发生波形重叠,解决的方法就是利用 ESIT 来识别波形成分。

例如典型的时间信号^[11]:

$$x(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega t). \quad (9)$$

$x(t)$ 的 Hilbert 变换由下式给出:

$$x_H(t) = -Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t), \quad (10)$$

式中, A 为振幅; $\omega = 2\pi f$, 其中 f 为信号频率; α 为射频信号衰减系数。

分离信号可表示为:

$$x_H(t) = -Ae^{-\alpha t} (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)). \quad (11)$$

取模量,则分离信号的自然对数由下式给出:

$$|x_A(t)| = Ae^{-\alpha t}, \quad (12)$$

$$\ln x_H(t) = -\alpha t + \ln A. \quad (13)$$

叠加信号由 2 个不同衰减系数 α 的信号组成,通过对数获得有若干波谷的波形,而波谷值(极小值)就是可提取的信号时间常数。

试验证明,对于 10mm 厚铝板电子束焊加工的垂直裂纹缺陷,手动定量准确率为 84%,经 ESIT 处理后的试验结果准确率被提升至 93%^[10]。

2.3 希尔伯特-黄信号处理

Chen 等人引入基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform,HHT)的信号处理方法来对薄板电子束焊垂直表面裂纹进行定量定位^[12]。具体的方法:首先,通过本征模态分解(Empirical Mode Decomposition,EMD)把信号分解成有限个频率从高到低的固有模态分量和一个残余分量;然后,排除噪声信号,选取能量较高的信号进行重构,重构信号满足信噪比要求($\geq 6\text{dB}$);最后,利用希尔伯特变换获取重构信号的包络,包络波峰反映出声波信号到达探头的时间。EMD 对于模态的筛选条件及过程可参考文献[13]。

试验制备了 2 块垂直裂纹试块,厚度分别为 8mm 和 10mm,共有 15 个裂纹,缺陷位置均位于传统盲区范围内($\leq 5\text{mm}$),缺陷长度在 0.80 ~ 2.50mm 范围内。试验结果显示,基于 EMD 对缺陷的识别平均误差为 0.08mm,最大误差为 0.16mm。TOFD 检测盲区降到距上表面 2.5mm。

Chen 等人还进行了 2 组探头参数对比试验。(1) 选用相同频率不同入射角度的探头时,探头入射角度对缺陷长度的准确率几乎没有影响;(2) 选用相同入射角度不同频率的探头时,频率的提高有助于缺陷定量准确率的提高。

3 典型结果分析

基于希尔伯特-黄变换的信号处理方法,相对于小波分析等方法,EMD 无需预先选择基函数,而是根据信

号本身的时间尺度,将信号分解成有限个包含原始信号不同时间尺度的固有模态分量(IMF),EMD更适用于非线性信号分析,并且近些年在工程信号等其他领域得到广泛的应用,利用希尔伯特-黄变换可以分辨出重叠波形,笔者也利用这种信号处理方法进行了试验,当裂纹缺陷高度较小(5mm)时,裂纹上下端的衍射波渡越时间差变短,致使波形之间容易发生混叠的情况(图6(a)),通过希尔伯特-黄变换,得到波形的EMD重构信号包络,可以很清楚地分辨出极值点位置,即缺陷衍射波上下两端衍射波的位置(图6(b))。目前希尔伯特-黄变换在8mm厚近表面2.5mm深的缺陷得到了应用^[12]。同时,自希尔伯特-黄自1998年由华裔学者Huang提出以来,包括原作者及其他学者都对EMD做出了进一步分析及改善^[14],由于EMD分解过程中,会受到有可能出现的信号本身时间尺度的影响,使得IMF分量存在模态混叠的问题,Wu和Huang^[15]提出了总体经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD),通过在时频原始信号上添加白噪声,改变了信号极值点特性,有效改善了上述EMD存在的问题。

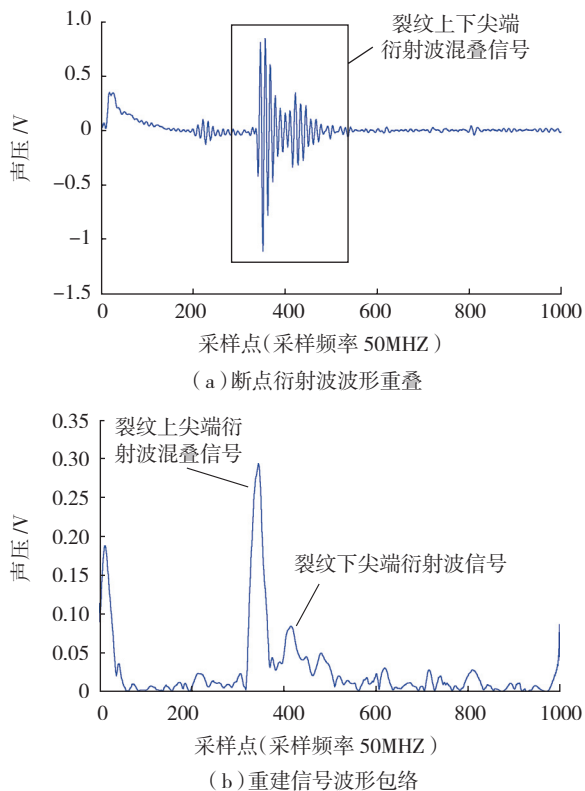


图6 基于希尔伯特-黄变换得到的典型结果

Fig.6 Typical results based on Hilbert-Huang Transform

4 结论

对于试件厚度小于12mm的薄板焊缝进行TOFD检测时,由于直通波与底波之间传播时间差变小,容易

使缺陷波与直通波或底波发生波形的混叠,给缺陷的定量和定位带来困难;针对薄板焊缝中的超声TOFD存在近表面检测盲区的问题,目前采用的主要方法有:(1)通过改变声波入射路径尽量摆脱直通波和底波盲区的限制(如TOFDW);(2)通过信号处理的方法来识别波形混叠中的缺陷波位置(如ESIT、希尔伯特-黄变换)。利用TOFDW方法,可检出8mm厚试件中2mm埋深的缺陷。

参考文献

- [1] Silk M G. Defect sizing using ultrasonic diffraction. British Journal of NDT, 1979, 21 (1):12-15.
- [2] Guide to Calibration and setting up of the ultrasonic time of TOFD technique. British Standard BS7706, 1993.
- [3] 郑晖,胡斌,林树青,等. 国外TOFD检测标准分析和比较.无损检测,2007.29(3):150-154.
- [4] Manjula K, Vijayarekha K, Venkatrarnan B, et al. Ultrasonic time of flight diffraction technique for weld defects: a review. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012: 4(24): 5525-5533
- [5] Chi D Z, Gang T. Shallow buried defect testing method based on ultrasonic TOFD. Nondestruct Eval. 2013.32: 164-171.
- [6] 迟大钊,刚铁,姚英学,等. 一种基于超声TOFD法的近表面缺陷检测模式. 焊接学报,2011.32(2): 25-28.
- [7] Nobukazu I, Hiroaki H, Arakawa T, et al. Examination of flaw detection near the surface by the ultrasonic TOFD method. Key Engineering Material, 2004.270:378-383.
- [8] Baskaran G, Balasubramaniam K, Rao C L, et al. Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique. NDE&T International, 2006.39:458-467.
- [9] Baskaran G, Lakshmana Rao C, Balasubramaniam K. Simulation of the TOFD technique using the finite element method. Insight, 2007.49(11): 641-646.
- [10] Baskaran G. Application of TOFD technique to thin sections using ESIT and PSCT. Nondestructive Evaluation, 2005.24: 813-819.
- [11] Baskaran G, Balasubramaniam K, Krishnamurthy C V, et al. Ultrasonic TOFD flaw sizing and imaging in thin plates using Embedded Signal Identification Technique (ESIT). Insight, 2004.46:537-542.
- [12] Chen T L, Que P W, Zhang O, et al. Ultrasonic nondestructive testing accurate sizing and locating technique based on Time-of-Flight-Diffraction method. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2005.41(9): 594-601.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998(454): 903-995.
- [14] Wang T, Zhang M C, Yu Q H, et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal. Journal of Applied Geophysics, 2012(83): 29-34.
- [15] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. Advances in Adaptive Data Analysis 1 (1), 1-41.

(责编 小城)