

超声 Δ 法与 TOFD 法在薄壁电子束焊缝上的检测结果对比分析

The Comparison Analysis of Test Result of Ultrasonic Δ Technique and TOFD Method

史亦韦^{1,2}, 王乃波², 卢超²

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095;

2 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 南昌 330063)

SHI Yi-wei^{1,2}, WANG Nai-bo², LU Chao²

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2 Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要: 采用超声 Δ 衍射法和 TOFD 法对模拟缺陷进行检测, 得出了缺陷检测波形图和 B/C 扫描图。对比分析了超声 Δ 衍射法与 TOFD 法的检测结果。实验表明利用超声 Δ 衍射法能够识别近表面垂直表面的面状缺陷, 有效地对缺陷进行定位, 能够很好地克服表面盲区, 对缺陷的检测识别能力不受缺陷方向限制。从检测结果数据可以看出超声 Δ 衍射法的检测灵敏度和缺陷识别能力优于 TOFD 法。

关键词: 超声 Δ 法; TOFD 法; 图像; 灵敏度

中图分类号: TG115.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)02-0020-05

Abstract: Through the inspection of ultrasonic Δ technique and TOFD method on simulate flaws, concluded signal oscillogram and B/C scan of flaws. The signal characteristics of ultrasonic Δ technique and TOFD method were analyzed and interpreted. The results show that the defects which are perpendicular to the surface can be identified and located effectively, and can overcome surface blind area effectively, and the recognition capability for defects is not limited by the orientation of them. From the results it can be seen that the achieved flaw sensitivity and probability of detection are substantially better than TOFD method.

Key words: ultrasonic Δ technique; time of flight diffraction (TOFD); image; sensitivity

传统的超声检测技术对于近表面垂直于入射面的面状缺陷难于有效检测, 如表面浅裂纹等^[1]。而这些缺陷恰是焊缝构件中最危险的部位。成为焊缝检测中令人关注的难题, 因此对于面状缺陷的准确检出和评价具有更为重要的意义^[2]。近几年来, 基于接收缺陷端点的衍射信号对缺陷进行定位定量的超声检测技术发展迅速, 成为解决该问题的主要方案^[3]。但是对于薄板焊缝, 由于随试件板厚减小到达接收探头的变形波信号增多、直通波与底波间距也减小、上下表面的盲区存在等使得缺陷信号识别及计算受到限制^[4,5]。超声 Δ 衍射法技术是另一种基于缺陷尖端衍射信号的检测技术, 与 TOFD 检测技术相比, Δ 衍射法具有表面盲区小、对垂直表面的缺陷识别能力强等特点, 对于检测薄焊缝中垂直于表面的缺陷具有明显的优势。本

工作就面状缺陷超声 Δ 衍射法和 TOFD 法信号和图像的特征进行对比研究, 并将这些特征运用到缺陷的识别以及定位上。

1 试块制作

实验模拟薄板电子束焊缝结构及其中易出现的缺陷类型, 设计制作了 9mm 厚的电子束焊缝试样, 试样选用不锈钢材质, 利用钻孔或电火花切割方式在试样上加工了缺陷, 缺陷参数如下:

槽型缺陷: 四个, 宽 0.1~0.2mm, 长 7mm, 间距 15mm;

侧孔缺陷: 一组四个, 孔深 10mm, $\phi 0.8$ mm, 中心间距均为 20mm;

竖孔缺陷：一组三个， $\phi 0.4\text{mm}$ ，中心间距均为 20mm ；
详细参数如表 1 所示。

表 1 缺陷参数

Table 1 Defects parameters

Defects number	1#	2#	I	II	a	b	c
Depth/mm	0.2	0.5	2.0	1.0	0.5	1.0	2.0

试样结构如图 1 所示。

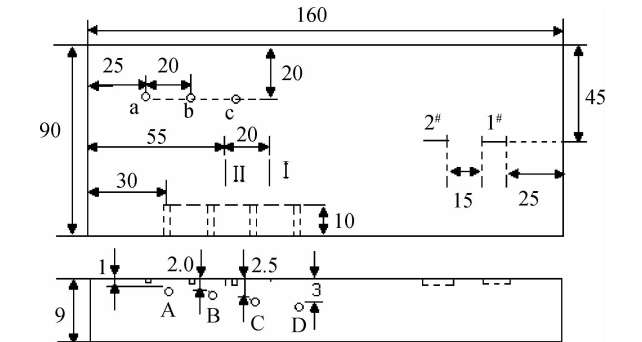


图 1 试样结构图(单位/mm)
Fig. 1 Sample structure chart (Unit/ mm)

2 实验方法

当超声波在材料中传播遇到面状缺陷而与之相互作用时，除了产生正常的反射波外，还会在缺陷端部产生衍射波。该信号会在一个较大的角度范围内辐射，并可从一系列不同方向接收到。超声 Δ 衍射法与 TOFD 法不同的是接收探头不与发射探头对称而是垂直于检测面^[6]，其基本检测原理如图 2~4 所示。为了适应窄小空间的要求，本实验采用水浸法实现。

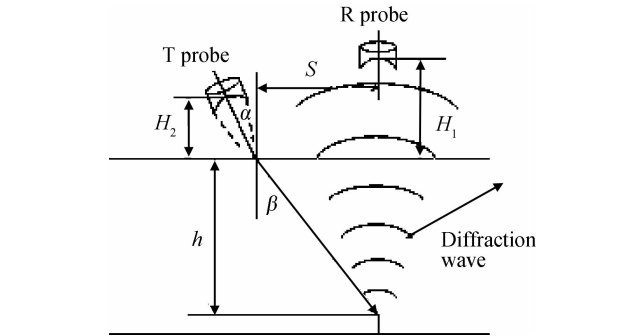


图 2 Δ 法检测原理图
Fig. 2 Detection principle of Δ method

本次实验除对比 A 扫描信号以外，还进行了扫描成像实验。 Δ 衍射法中发射探头与接收探头安置扫查

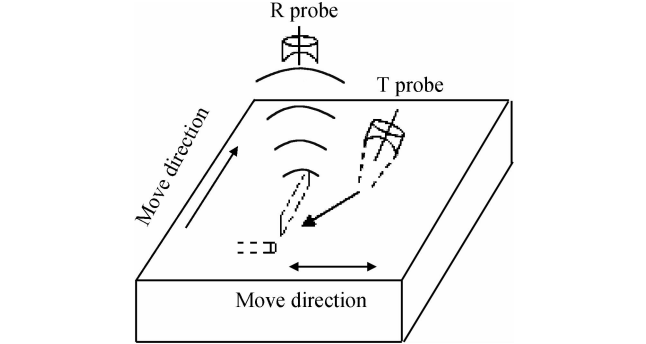


图 3 Δ 法扫描方式示意图
Fig. 3 Scanning mode of Δ method

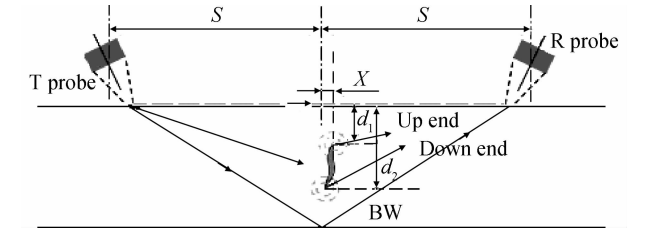


图 4 TOFD 法检测原理
Fig. 4 Detection principle of TOFD method

架上，扫查过程中发射探头沿两探头连线平行方向往复扫查，接收探头相对固定，同时扫查架沿探头连线垂直方向移动，即扫描方式与探头整体移动结合进行二维扫描，取幅度信息成像，则可得到一个纵截面的缺陷分布图即截面 C 扫描图^[7]，其 C 扫描图像由一系列的 A 扫描信号构建而成，利用这种方式可进行缺陷的定位和长度测定；TOFD 法取 D 扫描模式成像。

对于 TOFD 方法^[8]，探头角度和间距的选择要根据被检工件厚度确定。探头角度小，直通波与底面波的时间间隔大，分辨率高，深度测量精度高；而探头角度大，扫查覆盖范围大，但深度测量精度不高；频率越高深度分辨率越高，但频率过高波的衰减和散射也随之增大。因此需要根据被检要求综合选择，本实验选用 10M 平探头。从 Δ 法的探头布置方式以及扫查方式可知，探头折射角是影响检测结果的重要因素，由实验可知入射波在试样中的折射角在 $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间时衍射能量最大，因此本实验选用 58° 折射角和一对 10M 聚焦直探头。

3 实验结果与分析

3.1 A 扫描信号特征分析

超声 TOFD 方法利用纵波在试样中缺陷端部产生的衍射能量来进行测量^[9]（也可使用折射横波，在一些应用中也有好的检测效果），TOFD 方法探头布置方

式决定了其依靠脉冲声波传播的时间差来定量。

缺陷定位定量原理如图 4 所示,已知试件纵波声速 C ,则有:

直通波声程公式:

$$C \cdot t_0 = 2S \quad (1)$$

经缺陷上端点衍射波声程公式:

$$C \cdot t_1 = \sqrt{(S+X)^2 + d_1^2} + \sqrt{(S-X)^2 + d_1^2} \quad (2)$$

式中: t_0 为 LW 传播时间; t_1 为经过缺陷上端点的波传播时间; d_1 为缺陷上端点埋深; X 为缺陷与探头中心位的偏差; $2S$ 为探头入射点间距 PCS。

同理可得出经过缺陷下端点的衍射波传播声程公式。

当缺陷位于两探头中心时, $X=0$, 则式(2)可简化为:

$$C \cdot t_1 = 2 \sqrt{S^2 + d_1^2} \quad (3)$$

由此,通过下端点的声程公式可写为:

$$C \cdot t_2 = 2 \sqrt{S^2 + d_2^2} \quad (4)$$

其中: t_2 为经过缺陷下端点的波传播时间; d_2 为缺陷下端点埋深。

通过读出直通波与上端点衍射波时间差 Δt , 便可根据式(1)和(3)求出缺陷埋深 H 为:

$$H = d_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta t \cdot C)^2 + 4\Delta t \cdot C \cdot S} \quad (5)$$

同理也可由(1)和(4)求出缺陷下端埋深 d_2 , 则缺陷自身高度 h 为:

$$h = d_2 - d_1 \quad (6)$$

Δ 衍射法的探头布置方式决定了其不能用声程来直接确定缺陷埋深, 检测缺陷深度主要是根据信号幅度最大时工件表面入射点与接收点的间距, 以及折射波角度来确定。由于这种方法是垂直接收信号, 因此缺陷下端衍射信号不一定能接收到, 所以, 通常不能像 TOFD 法那样对缺陷高度进行定量。

Δ 衍射法中缺陷深度位置测定的基本原理如图 2 所示。只要已知水中纵波声速 C_1 和试件纵波声速 C_2 , 则缺陷埋深 h 可根据式(7)和(8)求出:

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2} \quad (7)$$

$$h = s \cdot \cot \beta \quad (8)$$

式中: C_1 为水中纵波声速; C_2 为工件中纵波声速; α 为入射角; β 为折射角; h 为缺陷埋深; S 为声波在工件入射点与接收点间距。

图 5, 6 是不同缺陷的检测信号波形图。

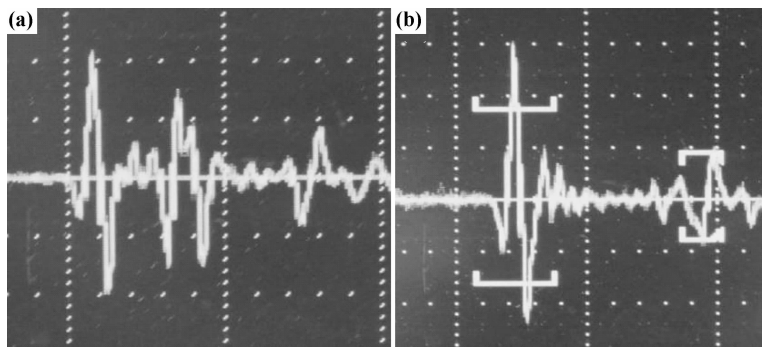


图 5 TOFD 法信号波形图 (a)侧孔 C; (b)槽 I

Fig. 5 Signal oscillogram of TOFD method (a)bye-hole C; (b)rabbit I

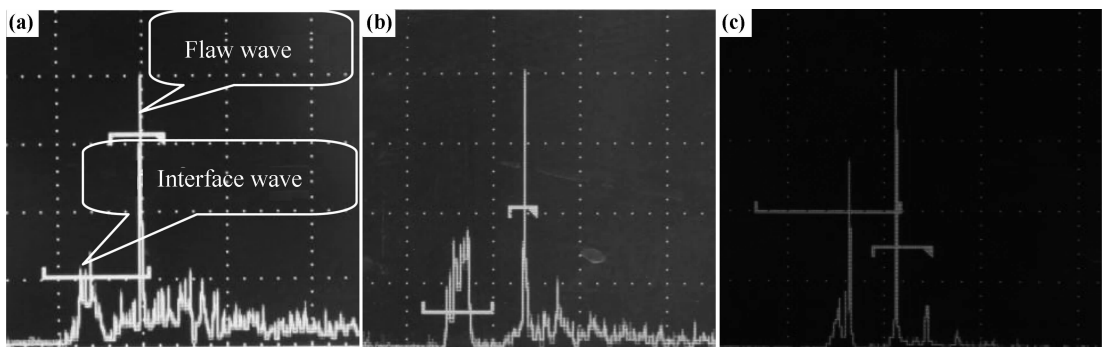


图 6 Δ 衍射法信号波形图 (a)侧孔 C; (b)竖孔 b; (c)槽 I

Fig. 6 Signal oscillogram of Δ diffraction method (a)bye-hole C; (b)vertical hole b; (c)rabbit I

从信号波形图可以看出,超声 TOFD 法^[10]与 Δ 衍射法有明显区别,TOFD 法有四个信号出现,其中包含了缺陷的相位信息,这对缺陷的识别有重要作用;而 Δ 衍射法除了缺陷信号外还有一个界面的影响信号,经实验验证在两探头间加一挡板可以过滤掉该信号,故可判断该信号是入射波在界面上的散射信号被接收探头直接接收而形成的试块界面波,这是在 S 较小时的一种典型信号。TOFD 法可以通过读取信号时间直

表 2 TOFD 法与 Δ 衍射法检测结果

Table 2 The detect results of TOFD method and Δ diffraction method

Defects type	Defects number	Burial depth	TOFD method	Δ method
Bye-hole	A	7.2	7.09	7.31
	B	6.2	6.0	6.12
	C	5.7	5.94	5.75
	D	5.2	5.38	5.12
Rabbet	1 [#]	8.8	—	—
	2 [#]	8.5	—	8.42
	I	7.0	7.08	6.93
	II	8.0	8.13	7.91
Vertical hole	a	8.5	—	8.36
	b	8.0	—	7.87
	c	7.0	—	6.90

接计算缺陷埋深和垂直高度,而 Δ 衍射法需要通过探头位置计算缺陷埋深。如图 5(a)中,直通波与缺陷上尖端回波信号时间间隔为 $0.45\mu\text{s}$,缺陷上下尖端信号时间间隔为 $0.12\mu\text{s}$,由此可计算出缺陷埋深为 5.94mm ,高度为 0.79mm 。图 5(b)中槽型缺陷的信号已经和直通波合在一起,只能读出一个信号,这与图像显示中直通波断裂相吻合。图 6(a)中,声波在工件入射点与接收点间距 s 为 9.2mm ,折射角为 58° ,由此计算缺陷埋深为 5.75mm 。对于 $\phi 0.4\text{mm}$ 的竖孔缺陷 TOFD 法接收不到明显信号,而 Δ 衍射法有明显的缺陷信号。

3.2 缺陷成像特征分析

图 7~11 分别是对不同类型缺陷,采用固定探头角度得到的 Δ 衍射法 C 扫描图像和 TOFD 法 D 扫描图像。

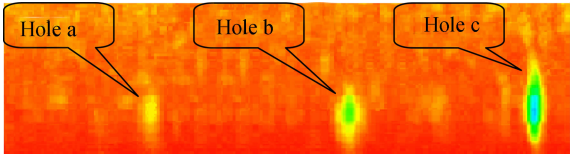


图 7 不同埋深竖孔 Δ 衍射法 C 扫描图
Fig. 7 C scan of Δ diffraction method with different burial depth vertical hole

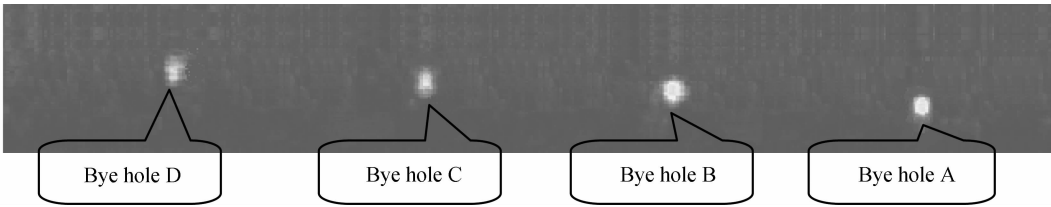


图 8 不同埋深侧孔 Δ 衍射法 C 扫描图
Fig. 8 C scan of Δ diffraction method with different burial depth bye hole

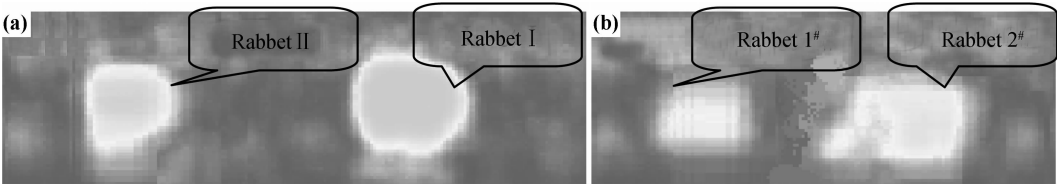


图 9 不同埋深槽 Δ 衍射法 C 扫描图 (a)母材;(b)焊缝
Fig. 9 C scan of Δ diffraction method with different burial depth rabbet (a)base metal;(b)welding

图 7~9 中, Δ 衍射法 C 扫描图中纵坐标表示焊缝高度方向,横坐标表示沿焊缝长度方向距离,实质上,由于接收探头相对固定不动,随发射探头的移动,所接收的信号是探头正下不同深度的缺陷衍射波,因此图像反映的是沿扫描方向的试块纵截面信息,从 C 扫描图中可以更直观地观察到缺陷信息。图 10,11 中

TOFD 法图像显示的也是沿扫描方向的试块纵截面信息,但没有 Δ 衍射法更直观。从扫描结果可以看出对于侧孔和槽型缺陷, Δ 衍射法和 TOFD 法都能清晰识别,但对于竖孔和近表面的槽型缺陷 TOFD 法却很难识别,而 Δ 衍射法由于没有底波的存在,可以较好的克服表面盲区的问题,对于竖孔和近表面槽均能很好

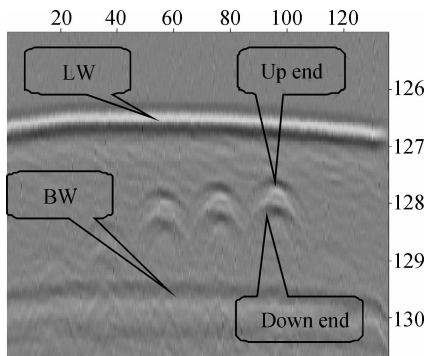


图 10 不同埋深侧孔 TOFD 法 D 扫描图

Fig. 10 D scan of TOFD method with different burial depth by hole

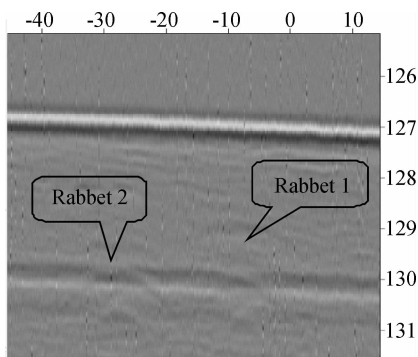


图 11 不同埋深槽 TOFD 法 D 扫描图

Fig. 11 D scan of Δ TOFD method with different burial depth rabbit

识别; Δ 衍射法结合 A 扫信号还可以对缺陷进行定位和长度测定。其中缺陷沿焊缝长度方向上的尺寸可以直接从仪器上读出^[11]。从实验结果可以看出,在本实验系统下 Δ 衍射法可以识别 0.5mm 的开口槽型缺陷,且检测结果比 TOFD 法更准确。

4 结论

(1)通过对模拟缺陷的对比检测,可以得出在本实验系统下 Δ 衍射法能够完成模拟试块缺陷的检出,其图像清晰、直观、易分辨;同时可以准确计算缺陷深度位置,可为焊缝质量评价提供比较准确的信息。且表面盲区小,灵敏度高,对于 $\phi 0.4\text{mm}$ 的竖孔缺陷和深度较小的槽型缺陷 Δ 衍射法的识别能力明显优于

TOFD 法,缺陷定位精度比 TOFD 法高。

(2) Δ 衍射法检测缺陷定位方式与 TOFD 法技术不同,需通过两探头的水平间距和斜入射角度进行转换,但是 Δ 衍射法相对于 TOFD 法很大的不足是不能对缺陷高度进行准确定量。整个检测过程操作简单,具备应用检测的能力。该系统可根据需要进一步扩展功能,如增添图像处理模块提高缺陷信号识别提取能力,从而提高定位检测的精度等。

参考文献

- [1] 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2002.155—215.
- [2] 史亦韦,任吉林.应用超声多区聚焦技术检测大厚度电子束焊缝[J].材料工程,2009,(6):76—80.
- [3] 李衍.超声衍射时差法探伤和定量技术[J].无损检测,2004,26(1):47—53.
- [4] 高双胜,王军.电子束焊缝超声无损检测声场特性及回波特征[J].焊接学报,2006,27(2):93—96.
- [5] 彭应秋,李坚.超声检测中的声场特性及应用分析[J].无损检测,2003,25(12):612—615.
- [6] SILK M G. The use of diffraction-based time-of-flight measurements to locate and size defects [J]. The British Journal of NDT, 1984,26(4):208—213.
- [7] 徐向群,张唯国.电子束焊缝超声 C 扫描检测技术研究[J].兵器材料科学与工程,2007,30(4):70—74.
- [8] 何莎,袁宗明.超声衍射时差法检测技术研究[J].中国测试,2009,35(3):104—106.
- [9] 李衍.薄板试件的超声 TOFD 法缺陷定量和成像[J].无损探伤,2005,29(5):2—5.
- [10] MIHARA T,OTSUKA Y,CHO H,etal. Time of flight diffraction measurement using laser ultrasound[J]. Experiment Meehanies,2006,46:561—567.
- [11] 李衍. ASME 法规对超声 TOFD 法的新规定第二部分:图像判读[J].无损检测,2007,29(5):294—300.

收稿日期:2010-04-08;修订日期:2011-07-11

作者简介:史亦韦(1962—),女,研究员,主要从事超声无损检测技术应用研究,联系地址:北京 81 信箱 6 分箱(100095),E-mail:yiwei_shi@yahoo.com.cn

通讯作者:王乃波,男,硕士研究生,从事超声检测技术研究,联系地址:北京市海淀区永定路 50 号 142 信箱 23 分箱(100039),E-mail:wnb0113@sina.com