

铝合金焊缝超声 TOFD 检测的信号特征

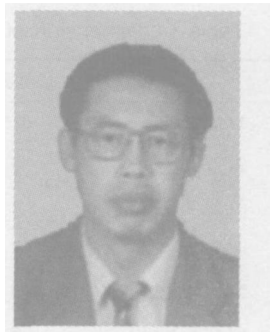
刚 铁, 徐 艳, 迟大钊, 吕 品

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对厚板铝合金焊接接头的检测, 研究了超声衍射时间差法 (TOFD) 检测时的信号特征及衍射规律, 并探讨了最佳检测工艺参数和缺陷测量精度。研究表明, 缺陷尺寸的测量结果与真实值基本吻合。其研究为实际焊接接头的检测奠定了基础。

关键词: 超声检测; 厚板铝合金; 焊缝

中图分类号: TG 115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)08-01-04



刚 铁

0 序 言

随着断裂力学的发展, 对焊缝缺陷特别是裂纹高度的测量引起了更多的重视^[1]。TOFD (Time of flight diffraction) 技术可以精确测量缺陷在板厚方向的高度, 并具有尺寸测量快速和可靠的特点^[2]。该技术是将超声波投射到裂纹等缺陷上后, 在缺陷的边缘上产生 360° 方向的衍射波为基础对金属部件进行检测^[3]。目前, 在国外这种技术已在实际检测中广泛应用, 并制定了相关的标准。例如, 欧洲已有关于 TOFD 法的 BS 标准 (1993) 和 CEN 标准 (2000); 日本也于 2001 年制定了用于 TOFD 法对缺陷定深测高的标准 (ND S2423, 2001); 美 ASME 则在最新版的标准范例中详述了 TOFD 法用于锅炉、压力容器焊缝检测的具体程序和要求^[4]。TOFD 检测方法的研究在国内尚属起步阶段。目前大厚度高强铝合金在民用和国防的焊接结构上的应用越来越广。文中针对厚板铝合金焊接接头的检测, 研究了超声 TOFD 法检测时的信号特征与衍射规律以及缺陷尺寸的测量。

1 试验方法

1.1 仪器及探头夹具

试验使用的仪器为超声自动扫描检测系统, 自行设计制作了超声 TOFD 检测专用探头夹具。探头夹具由滑槽、滑块、给水管、弹簧等几部分构成。

1.2 模拟缺陷试块

模拟缺陷试块是定量检测的基础, 采用铝合金作为试块, 用电火花在试块的不同位置加工了不同深度的窄槽, 具体形式及尺寸如图 1 及表 1 所示。

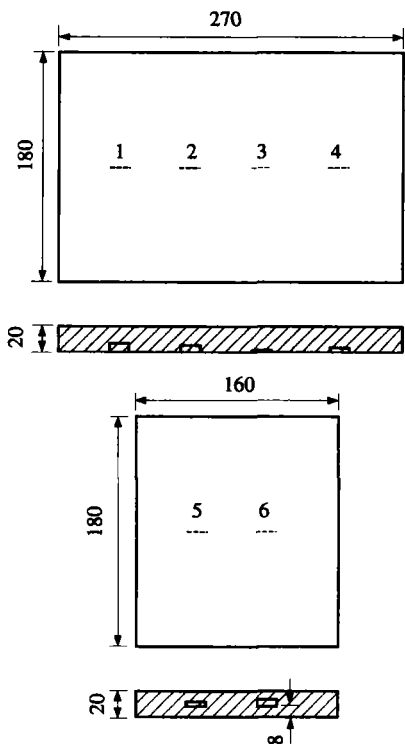


图 1 试验试件尺寸示意图

Fig 1 Schematic of sample dimension

1.3 探头的选择

探头的频率、折射角、晶片尺寸的选择除了通常的原则以外, 根据 TOFD 原理本身的特点、材料厚度

并参考欧洲标准^[9],最终确定选用频率为 5MHz 在铝中的折射角为 60°,晶片尺寸为 8mm×12mm 的探头。

表 1 底部缺陷及内部缺陷尺寸(单位: mm)
Table 1 Dimension of bottom and internal flaws

编号	缺陷高度	缺陷长度	缺陷宽度
1(底部缺陷)	6.5	15	0.55
2(底部缺陷)	5	15	0.45
3(底部缺陷)	1	15	0.45
4(底部缺陷)	3	15	0.55
5(内部缺陷)	3	15	0.5
6(内部缺陷)	5	15	0.5

2 TOFD 法的信号特征及衍射规律

2.1 侧向波的传播特性

TOFD法检测中,侧向波起着参考基准的作用,由于它沿着试件表面传播,所以其信号幅度与两探头间距的变化有关。将两个纵波斜探头相相对置,调节两探头的间距,使其在 35~75 mm 之间变化,并调整增益使侧向波波幅达满屏的 20%。观测侧向波信号随两探头间距的变化情况。结果表明,当两探头间距增加时,侧向波信号强度呈线性下降趋势。

2.2 缺陷上端衍射波传播特性

TOFD法中,缺陷端部衍射波的强弱将直接影响到检测缺陷的灵敏度。所以有必要研究衍射波在铝合金中的传播特性。超声波在试件中入射和接收的角度是影响衍射波强度的主要因素。因此首先研究不同角度下缺陷上端衍射波的行为,找到衍射波传播的最佳角度。这里将缺陷 1/2 高度处(即高度中点)的声束夹角 e 定义为中夹角。

将两纵波斜探头相相对置,且关于缺陷长度方向对称。对底部开口缺陷 1、2、4 改变中夹角,并使接收到的衍射波波幅达满屏的 40%,得出缺陷上端衍射波信号随中夹角 e 的变化曲线,如图 2 所示。可见,缺陷深度虽然不同,但上端衍射波信号均在中夹角为 105°左右时增益值最低,即此时衍射信号最强。

2.3 缺陷下端衍射波传播特性

以内部缺陷 5、6 为例,对缺陷下端衍射波的传播特性进行研究。调节中夹角的角度,保持下端衍射波的波幅达满屏的 40%。图 3 为缺陷下端衍射

波信号随中夹角 e 的变化曲线,可见,缺陷深度虽然不同,但下端衍射波信号均在中夹角为 130°左右时增益值最低,有利于发现缺陷。

综上所述,缺陷上端衍射波与缺陷下端衍射波分别在中夹角 e 为 105°及 130°左右时有最佳的衍射效果。综合考虑二者,中夹角为 118°左右时缺陷上下两端衍射信号均较强。与文献介绍的结果基本相符^[9]。现以不同中夹角,对试件 2 进行 D 扫描,结果如图 4 所示。由此可见, $e=120^\circ$ 的扫描图中缺陷端衍射信号较强,而 $e=130^\circ$ 时缺陷端的衍射信号明显变弱。表明在文中试验条件下,用 TOFD

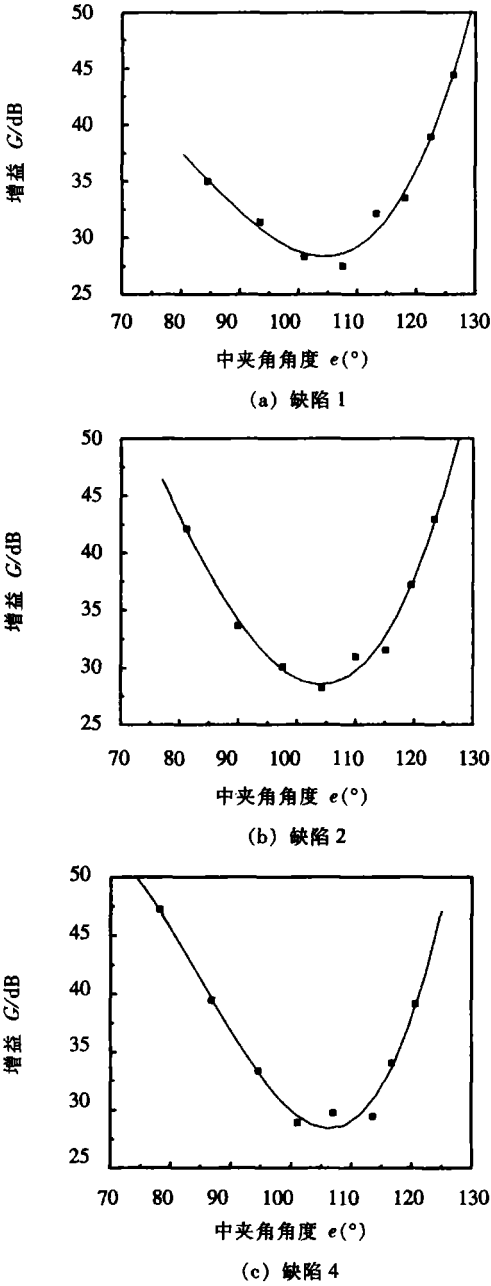


图 2 缺陷上端衍射波传播特性曲线
Fig. 2 Propagation characteristic curve of upper tip wave

法检测厚板铝合金时, 探头的最佳间距 $2S$ 为扫描声束的中心线以 120° 与所评价的缺陷深度区域相交时的距离。

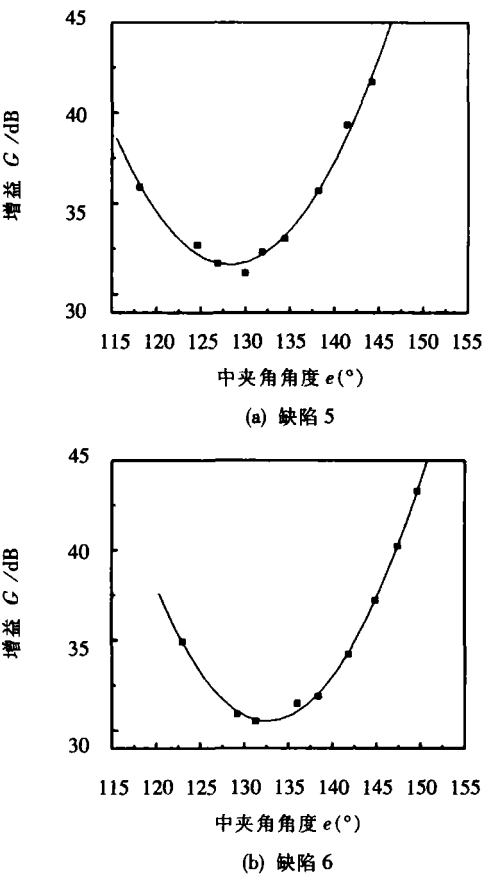


图 3 缺陷下端衍射波传播特性曲线
Fig. 3 Propagation characteristic curve of lower tip wave

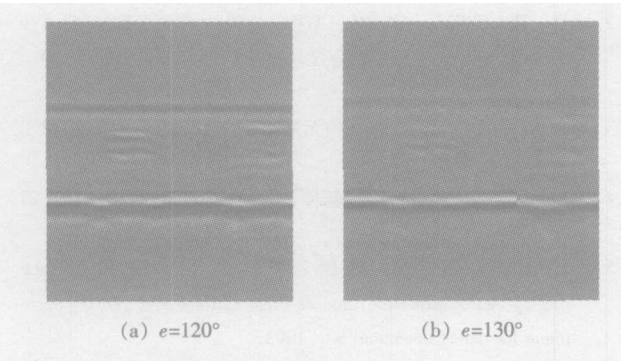


图 4 不同中夹角 e 时的 TOFD 扫描图
Fig. 4 TOFD scan image with different mid-include angle e

3 缺陷深度与高度测量

TOFD检测中缺陷深度主要是根据缺陷端衍射波与侧向波传播的时间差来确定, 这种计算方法可以避免探头延迟时间在测量中引起的误差。其测量

的基本原理如图 5 所示。
超声波自一探头发出, 入射到缺陷端部, 其衍射波被另一探头接收这一整个传播声程可用下式表示:
 $CT=[d^2+(S-X)^2]^{1/2}+[d^2+(S+X)^2]^{1/2}$, (1)
式中: C 为纵波声速; T 为缺陷顶端衍射波接收时间。

当缺陷处于两探头间距的中线位置时, 即 X 为零时, t 值最小, 此时上式可化简为

$$Ct=2[d^2+S^2]^{1/2} \tag{2}$$

用 TOFD 法时, 通常是测定沿试件表面传播的侧向波与缺陷端部产生的衍射波的传播时间差 t_b , 只要已知试件纵波声速 C , 两探头间距 $2S$, 则缺陷端部离试件表面的深度 d 可根据式 (3) 求出, 由缺陷两端的深度差即可求出缺陷在板厚方向的高度^[7]。

$$d=\frac{1}{2}[(t_b C)^2+4t_b CS]^{1/2} \tag{3}$$

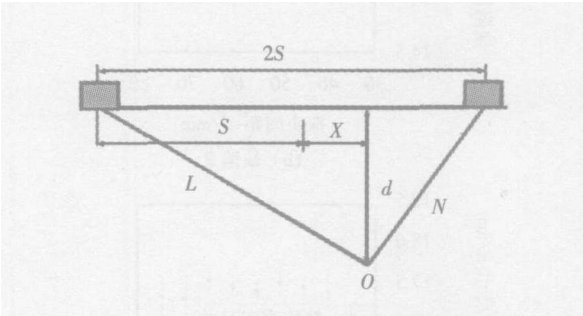


图 5 TOFD 法测量缺陷深度与高度
Fig. 5 Measurement of flaw depth and height by TOFD

注: S ——两探头间距的一半; d ——缺陷顶端距离表面的深度;
 X ——缺陷位置偏离探头中点的长度; L ——发射探头至缺陷端部的距离; N ——缺陷端部至接收探头的距离

图 6 为在不同探头间距下不同深度缺陷的测量结果。由图可知, 除个别点外, 上端距表面的深度测量误差约在 5% 左右。由于缺陷在试件底部, 所以缺陷自身的高度可由壁厚减去缺陷距离表面的深度求得。由此可见 TOFD 法可以较准确测量缺陷的深度及高度, 且在不同探头间距的条件下测量结果变化不大, 表明 TOFD 法测量缺陷尺寸有较高的稳定性。

4 超声 TOFD 法的实际应用

超声 TOFD 法具有检测快捷, 检测信息易保存等优点, 有广阔应用的前景。文中对实际焊缝进行了检测。采用双丝 M G 焊焊接厚度为 20 mm 的铝

合金板,焊缝为 X 形坡口的双面焊成形对接直焊缝。超声 TOFD 法检测的主要参数有:两探头间距 $2S=48\text{mm}$,增益 65db。检测到的缺陷主要为气孔及未焊透。焊缝的 TOFD 的法 D 扫描图像见图 7

所示。从 D 扫描图像上可以大致识别点、面缺陷的类型。结合 A、B 扫描,通过计算可以准确定位及定量焊缝中的各类缺陷。

5 结 论

(1) 用 TOFD 法检测厚板铝合金时,侧向波强度随两探头间距的增大而呈线性下降趋势,当探头的中夹角约为 105° 时,缺陷上端衍射波信号最强。当中夹角约为 130° 时,缺陷下端衍射波信号最强。从而确定了 TOFD 法检测厚板铝合金焊接时两探头的最佳间距,即中夹角约为 120° 时所对应的探头间距,此时衍射效果最佳,有利于发现缺陷。

(2) 采用 TOFD 法测量了底面缺陷的深度及自身高度,结果表明对缺陷高度的测量较准确,测量误差基本在 10% 以内,且在不同探头间距下测量结果变化不大,表明 TOFD 法测量缺陷尺寸有较高的稳定性。

(3) 研究结果对于大厚度铝合金板材焊缝的缺陷检测与定量分析具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] Liu Zhiyuan, Pei Run, Wang Ling, *etal*. A research on automatic ultrasonic inspection system for weld flaw [J]. Transaction of the China Welding Institution 2002 23(3): 71 - 74.
刘志远, 裴润, 王玲, 等. 一种焊缝缺陷自动超声检测系统 [J]. 焊接学报 2002 23(3): 71 - 74.
[2] 马 崇, 吴振勇, 宋力宏. TOFD 检测技术及测管装置 [A]. 2003 苏州无损检测国际会议论文集 [C]. 苏州: 2003. 29 - 36
[3] 李生田, 刘志远. 焊接结构无损检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000 58 - 85
[4] 李 衍. 超声 TOFD 法的基础试验 [J]. 无损探伤, 2003 27 (2): 4 - 10.
[5] The British TOFD Standard BS 7706 Guide to calibration and setting up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for defect detection [S]. 1993
[6] 李 衍. 焊缝超声 TOFD 法探伤和定量新技术 [J]. 无损探伤, 2003 27(5): 1 - 4.
[7] 三原毅. TOFD のやさしい解説 [J]. 非破壊検査, 2000 49 (2): 139 - 140

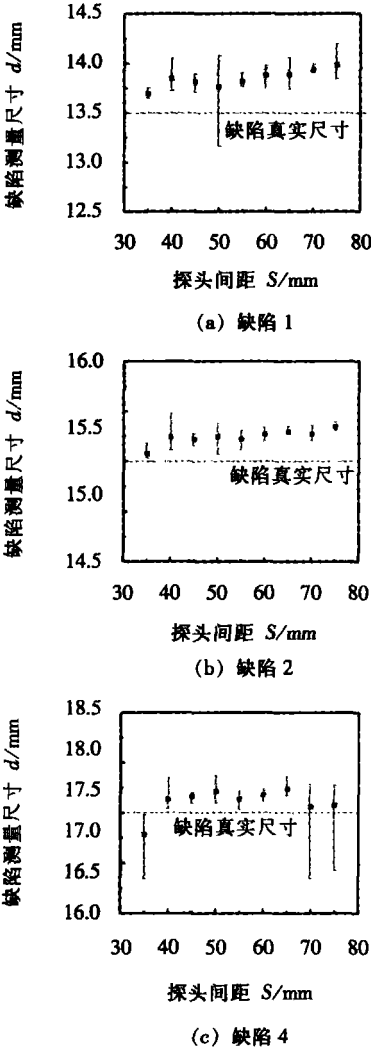


图 6 不同深度底部缺陷测量误差图

Fig 6 Measurement error of bottom flaws with different depth

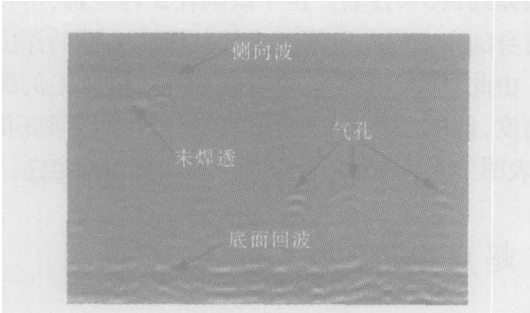


图 7 实际焊缝的 TOFD D 扫描图像

Fig 7 TOFD D-scan image of weld

作者简介: 刚 铁, 男, 1952 年出生, 工学博士, 教授, 博士生导师, 焊接国家重点实验室常务副主任。主要从事无损检测方面的科研工作, 发表论文 80 余篇。

Email gangt@mails.hit.edu.cn

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Signal characteristic of ultrasonic TOFD testing for aluminum alloy weld GANG Tie XU Yan CHIDa zhao LU Pin(StateKey Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001). p1-4

Abstract This paper presents a fundamental way of using ultrasonic TOFD (time of flight diffraction) method to detect locate and quantify the flaws in the weld. The ultrasonic TOFD signal characteristics and diffraction regularities are studied by testing thick aluminum alloy plate and the optimal technological parameters for test and measurement accuracy are discussed too. The experiment results show that the measured dimensions of the defects accord with the real ones and the study provides the foundation for nondestructive testing of practical weld of thick aluminum alloy plate.

Key words ultrasonic testing TOFD method thick aluminum alloy plate weld

Effect of forging force on fatigue behavior of spot welded joints of aluminum alloy CHANG Bao hua¹, DU Dong¹, SUI Bo¹, ZWang², Y. Zhou³(1. Department of Mechanical Engineering Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials Processing Technology Tsinghua University Beijing 100084 China 2. Dept. of Materials Science and Engineering University of Toronto Toronto Ontario M5S 1A4 Canada 3. Dept. of Mechanical Engineering University of Waterloo Waterloo Ontario N2L 3G1 Canada). p5-8

Abstract Using experimental and finite element analysis methods the effects of electrode forging force are investigated on residual stress and fatigue behavior of spot welded aluminum alloy joints. Results show that forging force significantly reduces the residual stresses in the heat affected zone (HAZ); the fatigue cracks no longer initiate from the HAZ while all cracks begin from the edge of nuggets. The mitigation of residual stress decreases the driving force for crack propagation and leads to higher fatigue strength.

Key words resistance spot welding aluminum alloys residual stress fatigue behavior forging force

Effect of Ti on the microstructures and properties of ceramic bonded joints with intermetallic compounds ZHANG De ku ZOU Gui sheng WU Ai ping LIU Gen mao(Department of Mechanical Engineering Tsinghua University Beijing 100084 China). p9-11

Abstract In this paper Si₃N₄ Ceramics were bonded with Ag-Cu-Ti and Ti-Ni-Ti multi interlayer. The joints were strengthened by intermetallic compounds formed in situ. The results showed that the thickness of Ti foil has an important influence on the microstructures proper

ties of joints and status of interfacial reaction layer. Thin Ti foil is favorable for form and distribution of intermetallic compounds but harmful for formation of interfacial reaction layer. While thick Ti foil has adverse effect on form and distribution of intermetallic compounds and interfacial reaction layer.

Key words Si₃N₄ Ceramics intermetallic compounds in situ brazing

Measurement and reconstruction for remanufacturing workpieces based on structured light stereovision YANG Pei¹, XU Bin shi², WU Lin¹(1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China 2. Armored Force Engineering Institute Beijing 100072 China). p12-15

Abstract A method of remanufacturing workpieces measurement and reconstruction based on structured light stereovision is proposed. A structured light scanner is mounted on the end-effector of the robot and scanned across the workpiece for data collection. Through the position and pose of the end-effector with the parameters of the sensor which can be obtained easily using a simple calibration method provided in this paper 3D coordinates in the basal coordinate of the robot are calculated by stereovision. The data obtained are digitized data organized in sections. The method of knot vector determination in the process of surface fitting is presented and the algorithm of B-spline surface fitting for profile data is given. The surface obtained can be sent to the off-line system to generate off-line program. Finally the method mentioned above is applied to remanufacturing piece.

Key words structured light stereovision surface reconstruction B-spline remanufacture

Magnetic field control on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer LIU Zheng jun CHEN Hong LIU Chen LIU Duo(Shenyang University of Technology School of Material Science and Engineering Shenyang 110023 China). p16-18 22

Abstract In order to control the shape and distribution of hard phase in surfacing deposit longitudinal DC magnetic field was applied to the plasma arc surfacing of two iron based alloys (Fe5 and Fe3). Hardness wearing microstructures and X-ray diffraction of the two surfacing deposit were tested. So the structure and property of the two powders' surfacing deposit were studied. The results show that the surfacing deposit of introducing magnetic field has higher hardness and better wearing resistance than the surfacing deposit without magnetic field. The properties of surfacing deposit are optimal when magnetic field current is 3A; The ideal hard phases such as Cr₇C₃ CrB etc are obtained and solid solutions