焊接缺陷的超声 C 扫描成像

刘德镇 魏 星 周艳华 (济南 山东工业大学)

摘 要 应用宽视场脉冲超声显微镜(WFPSAM)对所制备的典型焊接缺陷试样进行 C 扫描成像试验。 结果表明:利用超声显微镜的 C 扫描功能,可以获得焊接缺陷在不同深度层面上的二维声学图像。从所 显示的二维图像上可以直观地看到在一定深度层面上焊接缺陷的形状、位置、分布及取向。 根据缺陷图 像和所选择的扫描参数可以得到缺陷在层面各个方向上的尺寸,包括长度、宽度及单个分散缺陷的大 小、密集缺陷的分布范围等。利用计算机图像处理技术或几何作图法将不同深度层面上的 C 扫描图像 进行叠加,便可以得到试样的三维声学图像,从而可以得到缺陷的立体图像、三维尺寸和空间分布,为焊 接结构安全评定中的断裂力学计算提供了准确的依据。

关键词: 超声 C 扫描成像 焊接缺陷 宽视场脉冲超声显微镜 安全评定

0 序 言

超声显微镜(SAM)是以现代微波声学、信号检测和计算机科学为基础研制成功的可以无损、精密地观察物体内部结构三维图像的新型声学设备。声波具有良好的穿透性,易于穿透不透明的物体,形成声显微反差的机理是被测样品微观声学参数或力学参数的差异与分布。因而 SAM 能够得到不透明物体内部的声学或力学参数像,从而可以得到物体表面和内部结构的三维图像和大量信息^[1,2]。目前应用比较成功的是在生物医学工程中对活体组织和细胞的研究、在微电子工程中对集成电路内部结构的分析与研究。国内外已开始有人将 SAM 应用于材料科学中陶瓷材料的研究。但目前国内外文献中应用超声显微镜进行焊接缺陷的检测与研究尚未见报道^{3~9}。本文就是试图将超声显微镜应用于焊接缺陷的检测与研究,利用超声显微镜的 C 扫描功能获得焊接缺陷的超声层析成像,进而获得焊接缺陷的具体形状和精确尺寸,这就为重要焊接结构的安全评定,寿命评估和临界断裂应力计算等提供了准确的依据。

1 试验设备与试验方法

1.1 试验设备

采用俄罗斯科学院研制的宽视场脉冲扫描声学显微镜 WFPSAM (Wide Field Pulse Scanning Acoustic Microscope)。其结构原理方框图见图 1(a)。它由电路、声路、机械系统和微机四部分组成, 其中核心部分是声学系统,见图 1 (b)。

WFPSAM 的工作原理: 压电换能器 (常用氧化锌薄膜)在高频电信号的激励下产生频率 *f* = 10 ~10³MHz 的超声波, 通过声聚焦透镜在耦合介质水中会聚, 会聚声束遇试样表面发生折射, 声束在 试样内进一步会聚聚焦, 最终在一定深度 *z* 处聚成焦点。焦点形状并非几何上的点, 而是聚焦成一 个沿纵深方向的纺锤形狭窄区域。该区域横向尺寸越小, 声学显微镜的横向分辨率越高, 它取决于 超声换能器的工作频率。纵向尺寸与声透镜的凹面曲率半径有关, 它直接涉及声学显微镜的纵向 分辨率及探测深度。聚焦声束在机械扫描装置的带动下在样品内部扫描, 如遇到缺陷或声学特性 不均匀介质时,便会在界面上产生反射。反射波返回换能器转换成电信号,经信号处理后在显示器 上呈现出反映介质声学不均匀性的图像。



(a) Block diagram of structure principle

(b) Sketch diagram of acoustic system

图 1 宽视场脉冲扫描声学显微镜(WFPSAM)结构原理与声学系统示意图

Fig. 1 Sketch diagram of structure principle and acoustic system for WSPSAM

由于超声波在介质中的传播满足波动方程,在界面上的反射和折射服从 Snell 定律,由衍射理 论可得到反射式 SAM 的成像方程为^[1,7]:

$$U_d\left(\frac{x_d}{M}, \frac{y_d}{M}\right) = \iint_s (x_0, y_0) R(x_s - x_0, y_s - y_0) \mathrm{d}x_0 \mathrm{d}y_0$$

式中 U_d —— 样品的象函数, 决定显示器上样品声学图像各点的灰度或色彩

h —— 成像系统的点扩散函数取决于超声透镜结构和工作频率

R —— 样品的反射系数

 $M \longrightarrow$ 图像的几何放大倍数 $x_d = M x_s, y_d = M y_s$

x_s, y_s—— 样品上声束通过点的坐标

xd, yd——显示器上与 xs, ys 对应点的坐标

利用时间门电路技术可以区分和获得样品内不同深度 z 处的反射回波信号。SAM 通常有以 下三种工作模式:1.内部成像:显示器上呈现出内部不同深度 z 处的声学图像。2.表层、亚表层成 像:此时声透镜的理想焦点在样品的内部。样品的反射信号由入射纵波的反射波和透镜边缘区的 入射波在样品表面形成泄漏表面波的再辐射波两部分相干叠加而成,此时可从样品表面反射波中 获取表层和亚表层的结构信息。3.z 轴扫描工作状态和 V(z)曲线,由表层成像工作可知,表面反 射信号由两个分量组成。当声聚焦透镜在同一试样中沿垂直于表面的 z 方向扫描时所得输出电压 信号 V 随z 的变化称之为 V(z)函数。V(z)函数具有 瑞利波 半波长 的周期性振荡。不同材料的 V(z)曲线不同, V(z)函数可作为材料的声学特性,因此,也称为材料的声学指纹。

1.2 试验样品

样品制备选用厚度 T = 6 mm 及 T = 8 mm 的 Q235B 钢板,下料尺寸均为 320 mm×100 mm。 以特殊(非正常)工艺和材料由手工电弧焊制作典型焊接缺陷试板,焊后以 X 射线照相进行筛选并 确认典型缺陷的存在。对筛选出的典型焊接缺陷试板作 A 型超声波检测,以射线、超声两种方法 共同确定缺陷在试板中位置。所制备的典型焊接缺陷试板共有四块: 1. 气孔试板: T = 8 mm,焊缝 内部存在单个分散的大气孔及直径较小的密集气孔。2. 夹渣试板: T = 8 mm,焊缝 条状及分散点状夹渣。3. 未焊透试板: T = 6 mm, 在焊缝根部存在断续未焊透。4. 裂纹试板: 试板 焊缝内存在纵向裂纹一处。

WFPSAM 可容许试样的最大尺寸为 100 mm× 150 mm× 250 mm, 扫描范围为 100 mm× 100 mm, 为满足试样扫描要求将焊接缺陷试板切割为包括焊接缺陷在内的 100 mm× 100 mm 的典型焊 接缺陷试样。由于 SAM 在表层、亚表层成像时, 样品表面粗糙度对图像质量有较大影响, 而在内部 成像时表面粗糙度对图像质量影响不大。研究表明^[8], 在所选用的 f=25MHz 工作频率下, 表面粗 糙度 Ra 小于 1/25 波长时, 表面粗糙度对图像质量的影响较小, 可以忽略不计。钢中纵波声速为 $C_{\rm L}=5900$ m/s, 当f=25MHz 时波长 $\lambda = C_{\rm L}/f=236$ 4m, $\lambda/25=9.44$ 4m。为保证试验的成功, 对全部 试样的探测面进行了粗磨处理, 磨平了加强高, 并使表面粗糙度达到 $Ra \leq 6.3$ 4m。

1.3 试验方法

WFPSAM 可以实现 A、B、C 三种扫描方式。

A 型显示是脉冲显示, 与 A 型仪器显示波形相同。

B 型显示为试样纵剖面即与扫描声束平行截面上的声学图像显示。聚焦声束沿试样表面的一条直线扫描,荧光屏上显示沿扫描线垂直于试样表面的截面上的声学图像。

C型显示为试样内部与样品表面平行,垂直于扫描声束,但深度不同的横截面上的声学图像。 为此聚焦声束需作二维扫描,扫描轨迹可有许多形式,通常用矩形栅格扫描方式。改变电子闸门的 延迟时间就可得到不同深度的 C 扫描图像。

为了探索 WFPSAM 在焊接缺陷检测中能获得的信息,作者利用它的 C 扫描功能,对所制备的 焊接缺陷试样进行了逐层 C 扫描成像。

利用 WFPSAM 的C 扫描功能将声透镜聚焦焦点和时间门电路的接收信号调整到试样内部深度 z 处,选择合适的扫描步长,由机械扫描机构带动声透镜在试样表面上沿 x 和y 两个方向对深度 为 z 的层面进行扫描,从而获得焊接缺陷试样在深度为 z 的层面上的 C 扫描图像。在 WFPSAM 的 计算机内存储图像或用照相机记录图像,记录扫描步长与扫描范围。测量并记录显示图像尺寸,测量缺陷的图像尺寸,计算缺陷的实际尺寸。为记录方便和明确,规定沿显示图像水平方向的扫描方 向为 x 方向,沿显示图像的垂直方向为 y 方向。

2 试验结果与分析

2.1 焊接缺陷试样的 C 扫描图像

由于篇幅的限制,每种焊接缺陷选择两幅 C 扫描图像介绍如下:

(1) 裂纹试样的 C 扫描图像

在裂纹试样上获得的不同深度 z 处的两幅 C 扫描图像如图 2 所示。



(a) z = 3.68 mm

(b) z = 4.43 mm

图 2 裂纹的 C 扫描图像 Fig. 2 C-- scanning image of crack

(2) 未焊透试样的C 扫描图像

在未焊透试样上获得的不同深度 z 处的两幅 C 扫描图像如图 3 所示。



(a) z = 5.40 mm

(b) z = 5.80 mm



(3) 气孔试样的 C 扫描图像 在气孔试样上获得的不同深度 z 处的两幅 C 扫描图像如图 4 所示。



(a) z = 1.25 mm

(b) z = 1.48 mm

图 4 气孔的 C 扫描图像 Fig. 4 C⁻⁻ scanning image of blowhole

(4) 夹渣试样的 C 扫描图像

在夹渣试样上获得的不同深度 z 处的两幅 C 扫描图像如图 5 所示。



(a) z = 3.80 mm

(b) z = 4.40 mm

图 5 夹渣的 C 扫描图像



2.2 试验条件与图像尺寸

在不同焊接缺陷试样上进行扫描的扫描步长、扫描范围及所获得的 C 扫描显示图像尺寸与比例如表 1 所示。

表 1 焊接缺陷的 C 扫描试验条件与显示图像尺寸

Table 1 C-scanning experiments condition and display image size of weld defects

Length unit/mm

Defect image	Scanning depth	S canning step		Scanning range		Image size		Image scale	
	Ζ	x	у	x	у	x	у	x	у
	3.68	0.05	0.03	27.70	6.57	82.50	32.00	1:0.34	1: 0. 21
Crack	4.43	0.05	0.03	27.70	9.66	82.50	48.00	1:0.34	1:0.34 1:0.20
Poor	5.40	0.05	0.03	24.50	9.90	76.00	46.00	1:0.32	1: 0. 22
fusion	5.80	0.05	0.03	24.20	10.11	76.00	49.00	1:0.32	1: 0. 21
	1.25	0.10	0.10	33.90	20.80	52.00	31.50	1:0.65	1: 0. 66
Diownole	1.48	0.05	0.10	32.70	16.20	102. 50	24.00	1:0.32	1: 0. 68
S1	3.80	0.10	0.10	57.70	22.70	82.50	42.50	1:0.70	1: 0. 53
Stag	4.40	0.10	0.10	57.70	22.70	82.50	44.50	1:0.70	1: 0. 53

2.3 测量与计算结果

由焊接缺陷的C 扫描图像可以得到缺陷在图像中的尺寸,根据图像扫描比例可以计算缺陷的 实际尺寸。表2是根据图2~图5典型焊接缺陷C 扫描图像所获得的缺陷图像尺寸,以及计算出 的缺陷实际尺寸。 表 2 焊接缺陷的图像尺寸与计算得到的实际尺寸 Table 2 Image size of weld defect and real size by calculation

Weld defect	Layer depth	Image size	e of defect	Real size of defect by calculation		
	Ζ	x	у	x	У	
Crack	3.68	64.00	_	21.76	_	
	4.43	65.00	—	22.10	—	
D C ·	5.40	—	21.00	—	4.62	
Poor fusion	5.80	—	19.50	—	4.10	
Planda ala	1.25	44.50	18.00	28.93	11.88	
Diownoie	1.48	91.00	17.00	29.12	11.56	
CI	3.80	18.00	6.00	12.60	3.18	
Slag	4.40	17.50	5.60	12.25	2.97	

2.4 分析与讨论

由以上试验结果可见,利用 WFPSAM 的 C 扫描功能可以得到焊接缺陷试样在不同深度层面上 的超声 C 扫描图像。由于焊接缺陷与母材之间声学参数的不同,从而可以得到焊接缺陷在不同深 度层面上的二维声学图像。试验表明:二维声学图像可以显示出焊接缺陷在一定深度处的剖面图 像。对裂纹、未焊透等一类线状缺陷可以得到它们在层面上的形状、位置、分布和尖端走向。由所 选择的扫描比例和缺陷的图像尺寸可计算它们在不同部位的长度和宽度。对条块状夹渣及密集气 孔、夹渣等体积形缺陷可以得到它们在层面上的形状、位置、分布范围和密集程度,可以计算出它们 在不同部位的长度、宽度。对单个分散气孔、夹渣可以得到它们在不同层面上的分布位置,形状和 直径大小。

适当减少沿深度 z 方向上 C 扫描的层间间隔进行逐层扫描,可以得到一系列近于连续的缺陷 C 扫描层析图像。利用计算机图像处理技术或几何作图法,将一系列层面图像叠加,便可获得试样 的三维图像。由试样的三维图像可以获得缺陷的立体图像、三维尺寸和空间分布。

减小扫描步长,可以获得具有更高分辨率的图像,更适合于分散的单个细小夹渣、气孔类的检 测以及大尺寸缺陷的局部精细检测。

3 结 论

(1)利用WFPSAM的C扫描功能可以获得焊接缺陷在不同深度处的超声C扫描成像,从所显示的二维声学图像上可以直观地看到在一定深度层面上焊接缺陷的形状、分布、取向,根据缺陷图像可以得到缺陷在层面各个方向上的尺寸,包括长度、宽度及单个分散缺陷的大小,密集缺陷的分布范围等。

(2)将不同层面的C扫描图像进行叠加,便可以获得试样的三维图像,从而可以得到缺陷的立体图像、三维尺寸和空间分布,为焊接结构安全评定中断裂力学的计算提供准确的依据。

(3) 在实际的工程检测中可以用 A 型仪器及方法进行初探,检出缺陷并对缺陷准确定位之后, 对需作安全评定的缺陷部位利用 WFPSAM 进行层析成像,从而获得缺陷的立体图像、三维尺寸和 空间分布,可以同时满足工程检测及安全评定对缺陷检测的要求。

参考文献

- 1 陈戈林, 胡思正, 罗淑云等. 500M Hz 反射式机械扫描声学显微镜的研究和试制. 声学学报, 1988, 13(2):81~ 87.
- 2 张克潜,陈戈林. 声学显微镜的现状和发展. 电子学报, 1984, 12(4): 84~91.
- 3 Gan W S 等. 超声显微镜及其应用. 声学技术, 1992, 11(1, 2): 26~28.
- 4 陈戈林, 任文革, 郭艳林. 声学显微镜及应用研究. 无损探伤, 1993, (6): 7~11.
- 5 陈戈林, 胡思正, 罗淑云等. 智能化 THSAM-5 型声显微镜及其应用研究. 无损检测, 1992, 14(5): 122~124.
- 6 王应龙. 等离子喷涂陶瓷涂层的声学显微像. 应用声学, 1988, 7(4): 1~6.
- 7 胡建恺等. 超声检测原理与方法. 合肥: 中国科技大学出版社. 1993: 246.
- 8 Claudio. A coustic microscopy and dispersion of leaky rayleigh waves on randomly rough surfaces: A theoretical study. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1996 43(3): 428~433.

Ultrasonic C Scanning Image of Weld Defects

Liu Dezhen, Wei Xing, Zhou Yanhua (Shandong University of Technology)

Abstract Using wide field pulse scanning acoustic microscope (WFPSAM), ultrasonic C scanning image for typical weld defects samples have been studied. The results show that the two dimensional acoustic images of weld defects can be obtained in different deep layer by means of C scanning function of WF-PSAM. The shape, position, distribution and direction of weld defects in every deep layer can be direct observed from the two dimensional acoustic images. The weld defects size (including length, width and dimension of dispersed small defect, distribution range of concentrated defects) can be obtained, according to the defect image and chosen scanning parameter. The three dimension image of sample can be obtained by piling up C scanning image in different deep layer with the image processing technique of computer or the geometric drawing method. The stereo image, three dimensional size, space distribution of weld defects can also be detected, therefore, the accurate basis for calculation of fracture mechanics in safety assessment of welded construction are provided.

Key words ultrasonic C scanning image, welding defects, WFPSAM, safety assessment

作者简介 刘德镇,男,1942年生,1964年毕业于山东大学物理系。现为山东工业大学副教授、硕 士研究生导师。1982年起获得劳动人事部及中国机械工程学会高级无损检测人员技术资格。主 要研究方向:焊接检验、材料的无损检测与失效分析。已鉴定完成科研成果三项,获得山东省科技 进步奖一项,发表学术论文20余篇,主编著作一部,参编著作五部。