

# 全矩阵捕获和全聚焦法检测 标准化新动态

李 衍

(无锡市承压设备学会无损检测专委会, 无锡 214026)

**摘 要:** 双全法所得图像分辨率优, 保真度好, 信噪比高。其数据采集, 信息处理, 成像路径, 灵敏度校正, 网格验证, 显示识别, 补偿修正等过程是规范化操作的关键。通过解读国际标准草案 ISO/DIS 23865:2020, 介绍了超声“双全法”——全矩阵捕获(FMC)和全聚焦法(TFM)检测技术标准化最新动态。为标准化双全法高新技术在国内承压设备在制、在役检测中的应用提供了借鉴。

**关键词:** 双全法; 数据采集; 信息处理; 图像重建; 缺陷表征; 操作关键; 标准化

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)03-0088-09

## Recent progress of standardized FMC-TFM testing

LI Yan

(NDT Subcommittee of Wuxi Pressure Equipment Society, Wuxi 214026, China)

**Abstract:** The image obtained by FMC-TFM has better resolution, good fidelity and high SNR. Data acquisition, information processing, imaging paths, sensitivity correction, grid validation, indication identification and compensation correction are the key points of standardized operation. By interpreting the draft international standard ISO/DIS 23865:2020, the recent progress of the Full Matrix Capture (FMC) /Full Focusing Method (TFM) testing technique standardization are understood. The purpose of this paper is to provide reference for application of the advanced technology of standardized FMC-TFM for in-manufacture and in-service testing of pressure equipment at home.

**Key words:** Full Matrix Capture/Total Focusing Method technique; data acquisition; information processing; image reconstruction; defect characterization; key to operation; standardization

ISO/DIS 23865:2020《超声双全法检测一般用法》是由国际焊接学会(IIW)第 V 委员会(焊接产品质量控制与质量保证)制定, 由国际标准化组织(ISO)发布的最新标准(草案)。

超声检测(UT)是一种用于评价焊接接头体积完好性的无损检测方法。几十年来, 工业 UT 技术在不断演变, 相控阵超声检测(PAUT)相比于常规 UT 具有许多优势, 例如焊缝缺陷检出率明显提高。PAUT 已成为很有效的无损检测方法, 已被法规、

标准认可为可取代经典射线检测(RT)的一种方法。

超声 CI(计算机成像超声)技术进入 ASME 法规的最早年份如图 1 所示, 包括超声波衍射时差法(TOFD)、PAUT、双全法(FMC-TFM)等技术, 有关标准化要求已相继列入 ASME 标准第 V 卷第四章内。随着新一代超声设备计算机效率的提高, 大数据管理能力的强化, 近两年来, 又推出了全矩阵捕获(FMC)和全聚焦法(TFM)——所谓“双全法”的先进超声技术, 其缺陷表征功能大为改善, 广泛应用于工业领域, 相应国际标准也紧随出世。2018 年国际焊接学会率先发布了 IIW V-1842-18《超声双全法技术一般用法》, 即标准草案 ISO/DIS 23865:2020 之前身(两者内容大同小异)。另一国际标准体系 ASME 也在 2019 年版第 V 卷第四章《焊缝 UT》中以

收稿日期: 2020-08-12

作者简介: 李 衍(1940—), 男, 高级工程师, 主要从事承压设备的无损检测工作

通信作者: 李衍, taihuly@126.com

附录形式添加了双全法检测的具体要求：① 强制性附录 XI《全矩阵捕获》；② 非强制性附录 F《焊缝全矩阵捕获法检测》。但 ASME BPVC, V-2019 的双全法规范，仅适用于基于断裂力学验收标准的检测（即在役检测）。而 IIW 标准及 ISO 标准草案一开始就在适用范围中明确指出，双全法既适用于在制检测，也适用于在役设备的检测，亦适用于返修检测。

在正文和附录部分，还提出双全法不仅适用于焊接接头，也适用于锻件和铸件的检测，并给出了应用案例对其进行诠释（焊缝检测单独发布标准草案，即 ISO/DIS 23864-2020《焊缝超声双全法自动检测》）。

目前，现代计算机的处理速度，可实现双全法实时成像。双全法与常规 PAUT 的图像分辨率对比如图 2 所示。该图彰显了双全法检测的优势。

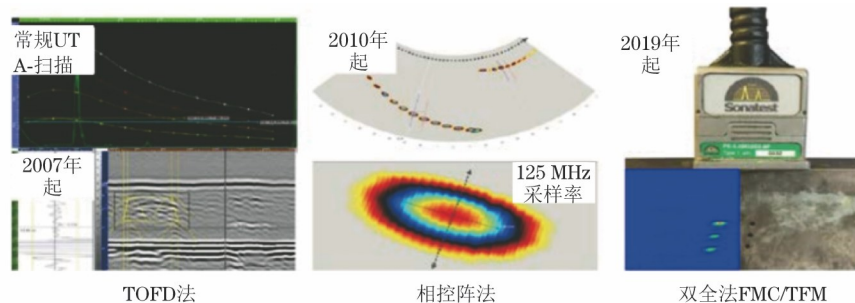


图 1 超声 CI 技术进入 ASME 法规的最早年份

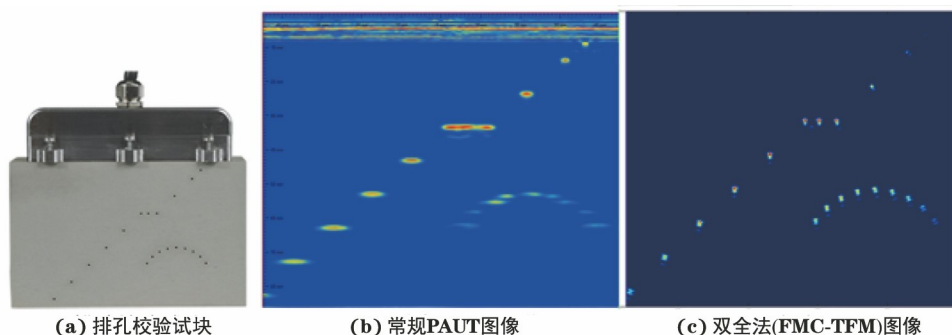


图 2 常规 PAUT 与双全法检测图像分辨率对比

全矩阵捕获与全聚焦法均为数字化程序驱动。全矩阵捕获是采集方式，而全聚焦法是对其采集的信号进行处理的最常用算法（其他替代算法，详见 ISO/DIS 23865:2020 附录 D）。FMC 是双全法施用的基础；TFM 是利用 FMC 数据生成的基本 A 扫信号重建图像的过程。为解读数据，TFM 算法中要输入一些关键变量，如声传播模式和分辨率，并按波集（或波程）分组。

PAUT 与 TFM 均可给出优质图像，图像质量高低取决于实际应用、探头选择和参数选用。TFM 可通过设置，使显示图像比 PAUT 更接近于实际形貌。TFM 有随处聚焦的优点（只要所用设置可在近场区进行检测）。一般说来，双全法产生的图像分辨率优，保真度好，信噪比高。

文章将从 15 个方面，解读双全法检测标准化的最新动态，对双全法通则进行详细分析。

## 1 适用范围

(1) 通则为使用双全法技术进行超声阵列检

测，提供了指导。旨在为在制、在役设备检测或返修检测，推行切实可行的做法。

(2) 通则中考虑的一些应用案例，涉及损伤评价中的表征和定量。

(3) 焊缝检测时适用标准为 ISO/DIS 23864:2020。

(4) 使用双全法的主要优势为，被检工件体积区域显示图像由系统对每个像素处接收到的声场作合成聚焦而生成，比普通相控阵技术的成像效果好，详见 ISO/DIS 23865:2020 附录 A。

(5) 通则所考虑的材料是低合金碳钢，但有些建议亦适用于其他材料[如奥氏体不锈钢焊缝双全法检测时，可参阅 IIW V-1843-18《IIW 奥氏体检测》（修订版）]。

(6) 通则不包括缺陷的验收等级。

## 2 重要术语

(1) 全矩阵。由  $n \times m$  个单元组成的矩阵，对应于  $m$  个发射信号与  $n$  个接收信号的所有组合，每

个矩阵单元均包含一个 A 扫描时域信号。

(2) 全聚焦法。关注区内合成聚焦(包括重建),通过处理相应发-收组合部分或全部的 A 扫描信息,并考虑声波从发射→像点→接收的行程,聚焦于众多网格点上。一般用全矩阵捕获(FMC)数据进行。

(3) 双全法。数据采集法和成像法的组合。

数据采集法涉及全矩阵捕获,而成像法涉及全聚焦法图像计算。数据采集法和成像法可用几种类技术完成(详见标准附录 B)。全矩阵捕获原理如图 3 所示。

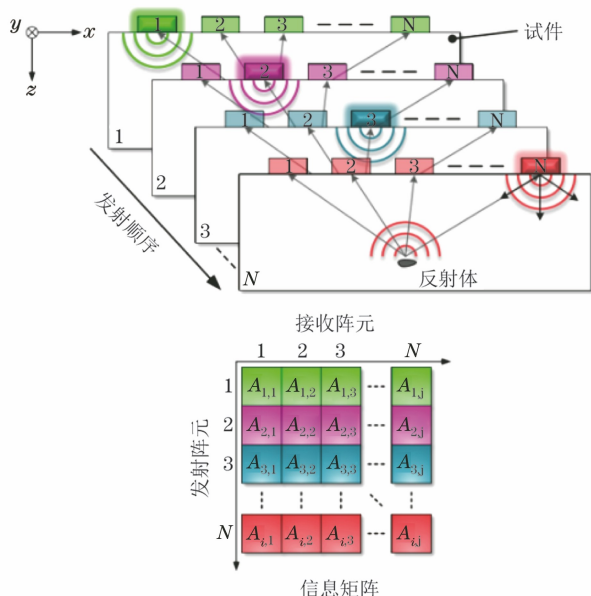


图 3 全矩阵捕获原理示意

(4) 关注区(ROI),又称 TFM 区。展示有效检测空间区域的二维或三维图像,其图像由计算得出。

(5) 双全法布置。指由探头特性(频率、探头晶片尺寸、波型)、探头位置及探头数量等参数限定的探头布置。

(6) 成像路径。成像算法考虑的超声传播路径(见表 1)按如下界定:发射阵元至某一像素点的波程(可选直接波程或间接波程);某一像素点至接收阵元的波程(可选直接波程或间接波程);每一波程的波型(一次波,或二次波包括变型波)。

(7) 双全法显示。需作进一步评定的缺陷图形或干扰信号。即需识别的真假显示;真显示为缺陷显示,要进行定位、定性、定量的显示;假显示指包括几何信号及其他伪影的显示。

(8) 扫查增量。机械扫查或电子扫描方向上,连续数据的采集点间距。

(9) 半矩阵捕获(HMC)。使用超声阵列探头

的特定数据采集过程,阵列中所有阵元依次发射声波,只有先前发射中未用于发射的阵元,或只有先前发射中使用的阵元(包括当前发射的阵元),才可用于接收每个发射脉冲,其目的是利用信号互易性,限制收集的数据量。半矩阵捕获(HMC)结果为 A 扫描信号量从  $N^2$  减为  $N(N+1)/2$ 。半矩阵捕获法原理如图 4 所示。

(10) 自适应聚焦。基于延时计算结果的聚焦,而延时计算基于参考测试信号。

(11) 网格。关注区中要计算和存储图像的点的集合,由点的位置及点-点在指定方向上的相对距离界定。

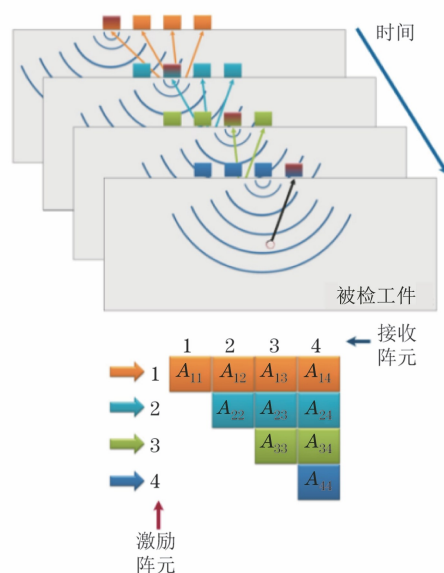


图 4 半矩阵捕获原理示意

### 3 技术原理

#### 3.1 概述

双全法和 PAUT 均使用一个阵列探头,阵列中每一阵元均独立于其他阵元。与阵元声波传播相关的物理特性,同样会以类似方式影响双全法和 PAUT 这两种技术的性能。标准 ISO/DIS 13588 规定,标准 PAUT 法是用主声阑(声孔径)产生的声束进行检测的。

相比之下,双全法检测时一般用全阵列,以获取最佳的聚焦成像性能,因此有效聚焦检测区域应设置在阵列近场区。PAUT 波束也可用双全法类似方式聚焦,即用大声阑(声孔径)或全阵列产生声束,使声压集中在特定点,应确保这些焦点均在声阑近场区内。

双全法可使用的各种成像路径如表 1 所示。

表 1 双全法成像路径

	示例	说明
	T-T L-L	直发直收
	T-TT, TT-T	直发间收
	LL-L, L-LL	或
	LT-T, T-TL	间发直收
	TT-L, L-TT	
	TT-TT	间发间收
	LL-LL	
	TL-LT	
	L-L T-T	直发直收(双探) (双阵列探头对置, 其间距已知)
	TT-TT	间发间收(双探)
	LL-LL	间发间收(双探)
	TL-LT	(双阵列探头对置, 其间距已知)

表中,直发直收表示直接发射,直接接收,即一次波发射,一次波接收;直发间收表示直接发射,间接接收,即一次波发射,二次波接收;间发直收表示间接发射,直接接收,即二次波发射,一次波接收;间发间收表示间接发射,间接接收,即二次波发射,二次波接收(一次波为 0.5S 波;二次波为 1.0S 波;T 为横波;L 为纵波)。

### 3.2 双全法与 PAUT 比较

PAUT 可将不同延时值施加到主声阑阵元上,以控制试件中的超声波束。这样可产生由主声阑各阵元小波相长、相消干涉所支配的波束。在接收阶段,基本信号可累加求和,给出一次 A 扫描。相控阵超声检测,除能使波束偏转一系列角度外,每一波束也能受控在主声阑近场区聚焦声压。

相比之下,双全法是一种后处理或成像技术,在激发阶段不会在试件中产生波束。传输到试件中的声场由组成声阑的一个阵元发射出来,而由此声场在试件中产生的回波,随即由声阑所有阵元记录下来,FMC 数据采集过程如图 5 所示。声阑上各阵元一一相继激发,而合成回波则由所有阵元记录下来,此过程称为全矩阵捕获。换言之,FMC 是声波信息从声阑阵元“一发全收”至“全发全收”的全矩阵捕获过程。

图 5 所示为全矩阵捕获过程的各步骤,具体为:① 1<sup>#</sup> 阵元激活,超声波前射入试件;② 波前抵达试件缺陷前;③ 缺陷反射波朝阵列方向返回;④ 波前抵达阵列阵元前;⑤ 信号被阵列全阵元采集;⑥ 过程持续,激活 2<sup>#</sup> 阵元,重复进行,直到激活声阑末端

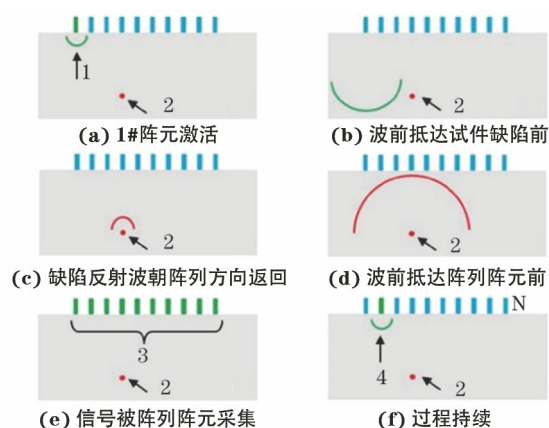


图 5 FMC 数据采集过程示意

N 号阵元。图中,1 为 1<sup>#</sup> 阵元发射的波前;2 为缺陷;3 为接收阵元;4 为 2<sup>#</sup> 阵元发射的波前。

随后,全矩阵捕获数据可用算法进行处理,该算法在数据矩阵上操作,以生成试件的缺陷图像。全聚焦法用于描述将计算延时律施加于全矩阵捕获数据的算法,以使声能聚焦于给定关注区(ROI)内许多点(像素)上。此成像阶段(TFM 施用于 FMC 数据)计算密集,但现代计算机系统完全可以胜任<sup>[1]</sup>。

全矩阵捕获算法的两个重要计算式如下。

(1) 与所有发-收阵元对( $i, j$ )和像点  $P$  相对应的超声飞行时间  $t_{ij}^P(P)$ ,由式(1)计算

$$t_{ij}^P = T_i^P + T_j^P \quad (1)$$

式中:  $T_i^P$  为像点  $P$  的声波入射飞行时间;  $T_j^P$  为像点  $P$  的声波接收飞行时间。

(2) 与各像点超声飞行时间、波程相应的  $N \times N$  波幅的总和,由式(2)计算

$$A(P) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S_{ij}(t_{ij}^P) \quad (2)$$

式中:  $S_{ij}$  为  $i$  阵元发射和  $j$  阵元接收的超声信号叠加到  $P$  位置的幅值;  $t_{ij}$  为声波阵元  $i$  到聚焦点  $P$  到阵元  $j$  所需延时值。

## 4 表面条件和耦合要求

双全法检测时表面条件至少应满足 ISO 16810:2014 要求(即扫描表面应无污垢、松散氧化皮、焊接飞溅等;应有足够均一的外形和光洁度;能保持声耦合良好;工件表面特征如会引起误判,检测前应予清除)。这是因为检测时通常都只用单一阵元作发射体,且任何衍射信号都可能较微弱,若表面状态差,会使得信号质量下降,从而严重影响检测的可靠性。

检测时可使用不同的耦合介质,但其类型应与



被检材料匹配。检测过程中,耦合介质特性应保持恒定;应处于适于使用的温度范围。

## 5 检测前需知

检测开始前,操作者应有权查阅指定的资料,包括:① 检测目的和范围;② 报告判据;③ 进行检测的制造或运行阶段;④ 母材类型或产品形式(铸造、锻造、轧制);⑤ 几何形状特征(特别是用反射法时);⑥ 可达性、表面状态及温度要求;⑦ 与焊后热处理相关的检测时间(有则指明);⑧ 验收条件和定量方法应由规范规定,检测前提供(为应用案例编写检测程序时采纳)。

怀疑材料各向异性时,例如奥氏体不锈钢,应特别注意频率和波型的选择。

## 6 检测人员

遵循本导则的检测人员,应按 ISO 9712:2012 或相关行业同等标准认证,经认证符合相应 UT 等级。

操作者除应具备焊缝超声检测一般知识外,还应熟悉并具有使用双全法的实际经验。应使用有代表性的试件进行过专门培训和考核。应使用最后确定的 UT 工艺和选定的 UT 设备,对有代表性的试样(内含类似于预期缺陷的自然或人工反射体),进行具体培训和考核(这些培训和考核结果应有记录文档)。

## 7 检测设备

### 7.1 概要

FMC 采集过程需有一系统,能逐一触发阵列探头单一阵元发射,并接收阵列中各阵元信号,也可使用包括自适应法的其他采集方法(见附录 B)。

TFM 过程需要快速处理能力和大存储容量,以处理由 FMC 采集获取的大量数据。也可在内存容量较小的情况下使用替代法[如基于平面波成像(PWI)]。

### 7.2 超声设备和显示

双全法设备可显示与常规相控阵超声设备类型相同的图像(B 扫、C 扫、D 扫),也可提供其他类型的图像(如立体合并视图等,见 ISO/DIS 23865:2020 附录 D)。

双全法检测用超声设备,应符合标准 ISO 18563-1—2015 要求。

设备应能获得全部或部分矩阵,对信息可自

行处理或输入计算机作后处理。超声系统的带宽设置应足以能接收频率为探头中心频率的两倍信号,且高、低通滤波器应适当设置,如高通设置不高于中心频率的一半,低通设置至少为中心频率的两倍。参数选用的具体数值,应在书面程序中明确规定。

TFM 处理后的可视化数据一般为关注区或 TFM 区。关注区是像素网格,每一像素均代表一区域计算出的波幅(见 ISO/DIS 23865:2020 附录 B)。网格一般为有规则的矩形,通常首选规则网格(可优化,以提高帧频——每秒帧数)。

选定的网格间距应足够小,以能检出相关缺陷。应选择图像内数据点最小空间分辨率(即像素间距、节点),要使探头位置小偏差时,参考反射体波幅稳定在容差范围内。ISO/DIS 23865:2020 附录 C 给出了波幅稳定性的校验指南。

### 7.3 阵列探头

任何线阵或矩阵探头均可用于 FMC 采集,但该标准仅限于使用线阵探头。双全法检测用超声阵列应符合 ISO 18563-2:2017《无损检测-PAUT 设备的表征和验证—第二部分:探头》的要求。

TFM 过程需要得到阵元相对于试件的位置信息(包括楔块延迟声程)以计算与成像路径相关的声束飞行时间。视应用,可使用与试件直接接触的探头,也可用有延迟声程的斜探头或水浸探头。

为得到高质量图像,阵列探头需具有以下特性:① 芯距足够小,以免空间混叠;② 阵元阻尼高,以减小超声波列长度;③ 阵元足够小,应避免有太多指向性;④ 声阑尺寸适当,以在距探头一定距离处成像(TFM 算法在探头近场区有最佳结果);⑤ 楔块尺寸优化,以确保功效。

通常,满足上述要求的探头,其相对带宽  $> 60\%$ ,阵元芯距  $<$  超声脉冲半波长(即  $e < \lambda/2$ )。

主声阑中失效阵元数的规定为:16 阵元中失效阵元不得多于 1 个,且失效阵元不得相邻(若不达标,仍用此探头时,须有相应技术证明)。相控阵超声探头主声阑和副声阑如图 6 所示,图中 A 为调控

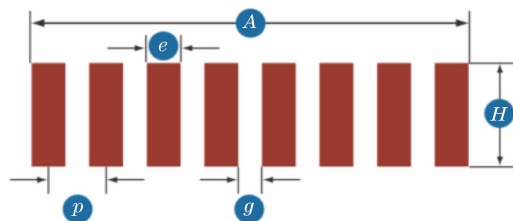


图 6 相控阵超声探头主声阑和副声阑关系示意

激活方向的主声阑； $H$  为阵元高度（固定），或称副声阑； $P$  为芯距，相邻两阵元中心间距； $e$  为单一阵元宽度； $g$  为相邻阵元间距。相控阵超声探头阵列主、副声阑与超声波束的相关性示意图 7 所示<sup>[2]</sup>。

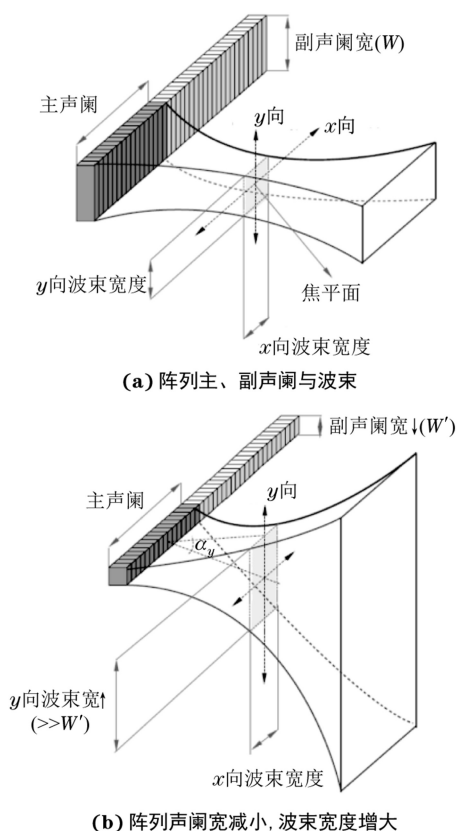


图 7 相控阵超声探头阵列主、副声阑与超声波束的相关性示意

## 7.4 扫查器械

为使图像（采集数据）保持一致性，要使用导向装置和扫查编码器。

在主扫查方向上，扫查增量的设置取决于被检工件的壁厚，推荐值如表 2 所示。在垂直于主扫查的方向上，扫查增量的设置应确保检测的体积覆盖范围。扫查速度应仔细调整，以适应设备性能。

表 2 主扫查方向与壁厚相关的扫查增量 mm

壁厚 $t$	扫查增量
$\leq 6$	0.5
$6 < t \leq 10$	1.0
$10 < t \leq 150$	2.0
$> 150$	3.0

扫查器的另一功能是提供定位数据，以生成与位置相关的双全法图像。

需要注意的是，双全法扫查器可为电动或手工驱动，应有适当导向装置导引；探头位置容差取决于

应用情况，应在检测程序中指明；扫查速度应与所用设备匹配，以免数据丢失。

## 7.5 采样频率

采样频率至少应为探头标称中心频率的 5 倍。若使用 A 扫描插入法（上采样），则硬件采样频率可减为探头上限频率（-6 dB）的 3 倍。

根据奈奎斯特采样定理，理论极限是信号上限频率的两倍。但在 A/D（模/数）转换前，应对非理想滤波器提供额外裕度。

## 7.6 数据处理

基于超声飞时（发射阵元→成像点→接收阵元）对 A 扫描数据进行处理的过程，通常称为成像。这是 TFM 的基础。为改善所得图像质量，所用处理算法还可以考虑某些物理变量，如指向性、扩散度、衰减度、反射率、透射参数等。

类似技术的详细说明，见 ISO/DIS 23865:2020 附录 B，如全聚焦法（TFM）、采样相控阵法（SPA）、反波场外推法（IWEX）等。

一旦数据处理成图像，还可用附加图像处理方法（如包络法等），进一步优化显示。

## 7.7 缺陷显示测评

推荐的测量方法有以下两种。

（1）从缺陷显示不同点（如端部）提取散射（衍射）信号，根据衍射信号图像，测评缺陷的显示尺寸。

（2）用相对于回波峰值的波幅降落法，测评缺陷的显示尺寸。

根据案例应用，也可采用其他测量方法。

## 8 各种成像路径

关注区或 TFM 区处于声波从发射阵元到接收阵元的传播路径（包括界面反射）中，可从不同方向，利用反射和衍射信号对关注区内的缺陷进行成像。

无向缺陷，即体积型缺陷会导致多向反射，而定向缺陷，即面积型缺陷棱边会导致多向衍射，通常可通过改变涵盖缺陷区域的各种成像路径来进行检测。利用最新开发的声学影响图（AIM）可对双全法检测成像路径布置进行优化。

一般来说，对定向缺陷（面积型缺陷），最好通过如表 3 所示的成像路径来检测，即缺陷的入射角  $\alpha$  和反射角  $\beta$  符合下列任意一种特征：①  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ；②  $\alpha \approx \beta$ ；③ 符合斯涅尔定律（缺陷处有波型转换时）。

表 3 定向缺陷(面型缺陷)不同成像路径的特征

缺陷反射取向	
缺陷水平或接近水平取向;缺陷其他取向,取决于缺陷面入射角和反射角	
缺陷垂直或接近垂直取向;缺陷其他取向,视波程中产生的变形波	
缺陷水平或接近水平取向;缺陷其他取向取决于缺陷面入射角和反射角	
缺陷水平或接近水平取向	
缺陷水平或接近水平取向	

## 9 检测准备

### 9.1 概要

检测目的应由规范规定。因此,应确定检测体积。被检工件表面温度应为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度若超出此范围,应验证设备的适用性。

TFM 类成像法需了解诸多相关参数,如测量系统、阵列、几何设置和材料特性等。这里概述与成像相关的参数。

### 9.2 系统校验

系统校验、调节应考虑阵元灵敏度,失效阵元以及楔块参数(声速、角度、尺寸)等。

这些项目的跟踪应按检测程序规定出具校正记录报告。需校验项目至少应包括:① 校准检查;② 覆盖范围检查;③ 灵敏度检查和调整;④ 达到相应检测等级需考虑的设置;⑤ 定量、表征、评定(表面和内部缺陷);⑥ 工艺规定要素;⑦ 校准试块、参考试块、评定试块;⑧ 报告设定要素。

### 9.3 灵敏度校正

对一般情况,可用  $\phi 3\text{ mm}$  横孔校正灵敏度(例如 ISO 19675—2017 中的 PAUT 校准试块)。

若应用需要,且处理过程不考虑所有传播效应,则可采用波幅校正。TFM 的波幅校正类似于 TCG(时间校正增益)或 ACG(角度校正增益)相控阵校验。探头置于参考试块上,在一组位于不同深度的横孔上方移动(可用仿真法校正灵敏度)。

如图 8 所示,令探头在横孔上方移动,记录各横孔回波幅度。此时,对关注区每条垂直线,对各横孔

均可测得相应波幅值。随后,将各横孔波幅调到基准线,测出所需增益值,以此完成横孔波幅深度校正。对横孔之间的点,其波幅增益值可用插值法求得(图中 1 为横孔;2 为参考试块;3,4 为探头移动方向)。

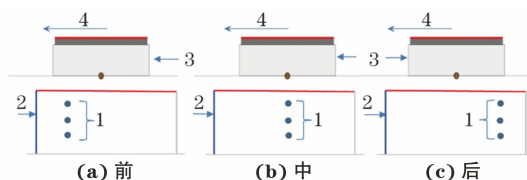


图 8 横孔灵敏度校正示意

按关注区或 TFM 区深度范围,所用参考试块需具有的横孔数量也不同,具体要求如表 4 所示。

表 4 灵敏度校正用横孔数

关注区深度 $d/\text{mm}$	设置横孔数	相邻两横孔深度差
$\leq 10$	1	—
$10 < d \leq 40$	3	—
$> 40$	—	$< 20\%$ 关注区总深

### 9.4 灵敏度设置

需要时,检测灵敏度须在代表要检测的缺陷的反射体上进行设置和验证。

采用多种成像路径(TTT, TTL)时,需分别校准灵敏度。视应用情况,也可按被检工件几何条件或噪声水平来进行设置、调整。

### 9.5 网格设置

网格设置关系到双全法的图像分辨率。对基本双全法来说,若网格点间距小于  $\lambda/5$  ( $\lambda$  为波长),可得稳定波幅[此规定值见 ISO/DIS 23865:2020 附录 C. 1. 3。波幅稳定性验证程序中,要求关注区偏移量的增量值小于  $\lambda/20$  (即随探头频率、波型而异),见同附录 C. 2. 3]。网格校验指南详见 ISO/DIS 23865:2020 附录 C。

## 10 检测程序

进行任何超声检测,均应制定书面检测程序。除标准 ISO/DIS 23865:2020 提出的要求,至少还应包括以下各项细节:① 被检产品说明;② 参考文件;③ 检测人员资质;④ 检测对象状态;⑤ 检测区域;⑥ 扫查表面准备;⑦ 耦合介质;⑧ 检测设备说明;⑨ 环境条件;⑩ 校验和调整;⑪ 扫查布图;⑫ 检测操作程序和说明;⑬ 记录和评定等级;⑭ 缺陷表征;⑮ 待用成像路径。

应用具体条件和双全法的施用,取决于被检产品类型和具体要求,并应在书面程序中作交代。对在役检测,建议用含自然缺陷的检测试块,验证检测程序



的有效性。按检测目的和产品类型,有关设置和图像示例的详细建议,详见附录 D。

焊缝检测,采用 ISO 23864:2020《焊缝无损检测-超声检测-使用(半)自动全矩阵捕获/全聚焦技术》标准。

首次检测前,应按规范要求,进行适当的程序验证。此验证包括检出所有要求的反射体,定量和分类性能,以及深度和宽度覆盖范围的证明等。

## 11 数据存储

与 PAUT 相比,双全法一般会收集到大量 A 扫描数据,这些数据对应于阵列探头所有发-收组合。图像用采集硬件或连接采集硬件的计算机上的 A 扫描矩阵计算。两种情况下,A 扫描数据量可能很大而不易储存。

构建的图像及应用的成像参数和处理步骤,应存储在硬盘或 IT(信息技术)服务器等数字存储介质上,供以后查阅。

## 12 双全法数据解析

### 12.1 数据解析流程

双全法数据解析流程如下:① 评定双全法数据质量;② 识别相关显示;③ 对相关显示按规定定位、定量;④ 对相关显示按规定分类;⑤ 按验收标准判定合格与否。

### 12.2 数据质量评定

双全法检测只向生成满意的图像,才可作出把握的评定。而网格分辨率、波幅保真度、图像信噪比,是双全法图像质量的重要指标。满意的图像有如下界定标准:① 耦合良好;② 时基调整良好;③ 灵敏度调整适当;④ 信噪比良好;⑤ 有饱和度指示;⑥ 数据采集达标。

双全法图像质量评定要求操作者技能熟练、经验丰富(见第 6 节)。书面检测工艺应根据应用给出要求,若图像不满意,要求数据重新采集(重新扫描)。

### 12.3 相关显示识别

双全法检测中,工件缺陷和几何特征都会形成显示。为识别几何特征显示,需了解工件细节。为判定图像是否为由缺陷引起的显示,并评估声传播模式或干扰时,应考虑其几何形状和一般噪声水平的信号幅度。

根据应用,书面检测工艺中应提出信号评定的

有关细则。

## 13 检测报告

双全法检测报告应符合标准 ISO 16810:2012 要求,另外,还应包括以下内容:① 检测试件,校验试块,参考试块;② 探头型式、频率、角度、相对于参考线的位置;③ 已检出的相关显示的图像,并至少标出位置;④ 分辨率、覆盖范围及网格分辨率检查结果(见 ISO/DIS 23865:2020 附录 C)。

应记录下所用双全法检测相关设置,此记录应包括:① 灵敏度设置;② 采集过程;③ 成像过程;④ 关注区细节;⑤ 所用成像路径;⑥ 扫查布图;⑦ 定量、表征方法。

## 14 补偿修正

壁厚变化会引起成像路径(包括后壁反射)生成的缺陷图像显示出现散焦、错位的现象。对此可在后处理中作补偿修正,或用自适应成像法进行修正。

由晶粒组织拉长(如钢材轧制产生)引起的各向异性,会造成缺陷显示散焦。对此可通过限制声阑、使用小角度波程、使用相关角度的声速或使用自适应算法,作补偿修正。

制造或焊接方法产生的几何形状不规则,会造成工件表面不平整,以致声束在表面发生反射或透射,而引起缺陷显示出现散焦,对此可用自适应算法补偿修正。

全矩阵捕获的一个潜在问题是,每次只触发一个阵元发射脉冲,探头发射声能有限。因而,此声束能量会在衰减性或很厚的材料中扩散,不能透射到缺陷位置。对此,可选用更合适的探头或使用多阵元发射法采集,进行补偿修正。

若温度超出 9.1 节规定范围(即 0℃ 以下或 50℃ 以上),则应使用与被检工件同材料参考试块(内含所需关注区横孔),在与被检工件相同温度条件下,校正成像特性。

其他超声技术也受上述这些特性影响。值得注意的是,在其他超声技术无能为力的情况下,双全法仍可对工件进行高质量检测。

## 15 解读补遗

### 15.1 标准面世过程

国际标准草案 ISO/DIS 23865:2020(E)已提交所有成员国表决(征询时间为 2020-1-9 ~ 4-2)。



2018年6月10日曾以国际焊接学会 IIW 名义发布  
的两标准是 IIW V-1842-18《超声双全法检测一般  
用法》及 IIW V-1843-18《焊缝超声双全法自动检  
测》便是该草案的前身。我国是 ISO 和 IIW 两国际  
机构的主要成员国,对双全法这两份国际标准草案  
发表了重要的意见。

### 15.2 检测程序评定

双全法检测应按书面程序进行,检测程序卡应  
至少包含表 5 中的要求。由于过程或设备特殊,重  
要变量需增补时,也应在卡中注明;每一重要变量均  
应规定一个数值或数值范围。

软件修正一般不要求程序重新评定,除非存在  
影响超声信号的显示、记录或自动处理的变化。软  
件修正应有文档对应储存,以便查阅。

检测程序卡制定后须在含缺陷试样上作演示验  
证评定,以确认其达标。双全法检测程序卡的制定  
和评定内容如表 5 所示(内容引自 ASME BPVC—  
2019 第 V 卷第四章表 XI-421.1-1)。

## 16 结语

(1) 以解读 ISO/DIS 23865:2020 为例,简述了  
当今全矩阵捕获(FMC)和全聚焦法(TFM)检测技  
术标准化的最新动态。

(2) 分析了包括数据采集、信息处理、成像路  
径、灵敏度校正、网格验证、显示识别、补偿修正等  
在内的双全法规范化操作的要诀。

(3) 为确保检测质量,建议预先创建仿真灵敏  
度图,并通过验证测试给出仿真结果,以此来确认数  
据是否准确、有效且可靠。

(4) 采用信号包络可进一步改善表征,并提高  
相对于标准振荡 TFM 图像的采集率。波幅保真  
度,网格分辨率,图像信噪比是确保双全法图像质  
量的关键三要素。

(5) PAUT 在行业内已成功应用 20 余年,其应  
用案例众多,同时该技术的性能及局限性,已早有定  
论。双全法的理论与工业实践则有待充分开拓,国  
内标准化亦需急步直追!

表 5 双全法检测程序评定内容

变量分类	序号	名称
重要变量	1	被检焊缝结构,包括厚度、材料、产品形式
	2	施探面(外面或内面,单侧或两侧)
	3	方法(直探,斜探,接触法,水浸法)
	4	校验(试块,方法)
	5	几何信号与缺陷识别方法
	6	人员操作要求
	7	仪器型号和制造者
	8	计算机软件和版本
	9	探头制造者和型号(阵元芯距,尺寸,阵元数, 频率,接触面间距)
	10	楔块尺寸(切割角度,尺寸,材料外形)
	11	检测体积
	12	达到波幅保真度的方法
	13	帧的说明(时态范围,密度)
	14	后处理网格(高,宽,密度)
	15	图像重建法
	16	扫查布图
	17	扫查器型号和制造者
	18	扫查方式
	19	扫查、吸附、导向装置
	20	缺陷测长测高
一般变量	1	焊缝定位基准点
	2	人员资质要求
	3	表面状态(检测表面,校验试块)
	4	耦合剂(牌号或类型)
	5	检测后清理法
	6	自动报警或自动记录
	7	记录,包括要记录的最少校验数据

### 参考文献:

- [1] 李衍. 超声相控阵全聚焦法成像检测[J]. 无损检测, 2017,39(5):57-64.
- [2] 王悦民,李衍,陈和坤. 超声相控阵检测技术和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2014.