

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD01-2017



中 国 船 级 社

船用厚板焊接接头衍射时差技术（TOFD）及
相控阵超声（PAUT）联合检测
技术指南
2017
(Rev. 1)

生效日期：2017年7月1日

北京

目 录

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 第 1 章 | 通则 | 2 |
| 1.1 | 目的 | 2 |
| 1.2 | 适用范围 | 2 |
| 1.3 | 附加标志 | 2 |
| 1.4 | 术语及定义 | 3 |
| 1.5 | 检测机构及人员 | |
| 第 2 章 | 一般要求 | 6 |
| 2.1 | 检测设备及器材 | 6 |
| 2.2 | 仪器的定期校验 | 9 |
| 2.3 | 检测工艺 | 9 |
| 第 3 章 | 检测工艺参数的选择和设置 | 11 |
| 3.1 | 检测区域 | 11 |
| 3.2 | 检测工艺设计 | 11 |
| 第 4 章 | 检测要求 | 13 |
| 4.1 | 总体要求 | 13 |
| 4.2 | 仪器设置 | 13 |
| 4.3 | TOFD 系统调试 | 14 |
| 4.4 | PAUT 系统调试 | 15 |
| 4.5 | 检测实施 | 15 |
| 第 5 章 | 检测数据分析及判读 | 17 |
| 5.1 | 数据有效性评价 | 17 |
| 5.2 | 相关显示及非相关显示 | 17 |
| 第 6 章 | 缺陷评定与质量分级 | 18 |
| 6.1 | 总体要求 | 18 |
| 6.2 | TOFD 缺陷评定 | 18 |
| 6.3 | PAUT 缺陷评定 | 19 |
| 6.4 | 质量分级 | 19 |
| 第 7 章 | 检测记录及报告 | 23 |
| 7.1 | 检测记录及报告 | 23 |
| 7.2 | 检测数据的保存及归档 | 23 |
| 附录 A | 不等厚对接焊缝的检测 | 24 |
| 附录 B | 典型 TOFD 成像及缺陷测量方法 | 25 |
| 附录 C | 船舶重要区域 | 33 |

第1章 通 则

1.1 目的

1.1.1 为了保证大型化船舶结构厚板焊接质量，制定本指南，为制造单位选用衍射时差技术（TOFD）及相控阵超声（PAUT）联合检测技术进行船舶结构/构件中厚板对接焊缝的无损检测提供参考。

1.2 适用范围

1.2.1 本指南规定了大型集装箱船、大型矿砂船等结构检测中，使用衍射时差技术（TOFD）及相控阵超声（PAUT）联合检测方法对厚板对接接头进行检测的方法及要求。其他船型的厚板检测也可参照本指南进行。

1.2.2 本指南中定义的厚板是指公称厚度不小于 30mm 的船用钢板。

1.2.3 本指南适用于同时满足以下条件的焊接接头：

- (1) 母材及焊缝材料为低碳钢或低合金高强钢；
- (2) 接头形式为全熔透型对接接头；
- (3) 材料厚度 t ：30mm $\leq t \leq$ 100mm（当焊缝两侧母材厚度不一致时，以薄侧母材为准）。

1.2.4 单独使用 TOFD 技术或 PAUT 技术见 CCS《衍射时差法 (TOFD) 和相控阵超声检测 (PAUT) 技术应用指南》。

1.2.5 对于无法满足 TOFD 及 PAUT 联合检测实施条件的结构部位，应按原检测方法进行检测。

1.3 附加标志

~~1.3.1 按照本指南要求对厚板对接焊缝进行过 TOFD 及 PAUT 联合检测的船舶，如所有检测位置检验合格，经船东申请，可授予“ANDT (TP)”船舶附加标志。~~

1.3.1 对如下检测范围使用衍射时差技术（TOFD）及相控阵超声（PAUT）联合检测的比例满足下述要求，经船东申请，可授予相应附加标志。

TOFD/PAUT (20%)：使用 TOFD/PAUT 联合检测焊缝比例分别超过 20%。

TOFD/PAUT (40%)：使用 TOFD/PAUT 联合检测焊缝比例分别超过 40%。

TOFD/PAUT (70%)：使用 TOFD/PAUT 联合检测焊缝比例分别超过 70%。

集装箱船检测范围：货舱区域所有上部纵向构件（厚度 \geq 35mm）的分段合拢对接焊缝，包括内壳/舱壁最顶部列板、舷侧顶列板、主甲板、围板板、围板顶板及所有附连的纵向扶强材。

矿砂船检测范围：货物区域主甲板（厚度 \geq 35mm）对接缝；

LNG 和 LPG 船舶检测范围：整体液货舱或独立液货舱的全焊透焊缝（不包括薄膜舱和角焊缝）。

1.4 术语与定义

1.4.1 本指南采用的术语与定义如下：

- (1) 衍射时差法超声检测 (TOFD, Time of Flight Diffraction): 是采用一发一收探头对工作模式、主要利用缺陷端点的衍射波信号探测和测定缺陷位置及尺寸的一种超声检测方法。
- (2) 扫查面系指放置探头并进行扫查的工件表面。
- (3) 底面系指与扫查面相对的工件另一侧表面。
- (4) 直通波系指从发射探头沿工件以最短路径到达接收探头的超声波。
- (5) 底面反射波系指从发射探头经底面反射到接收探头的超声波。
- (6) 探头中心间距是发射探头和接收探头入射点之间的直线距离。
- (7) 平行扫查指探头运动方向与声束方向平行的扫查方式，一般指探头沿 Y 轴运动的扫查方式，见图 1.4.1 (a)。

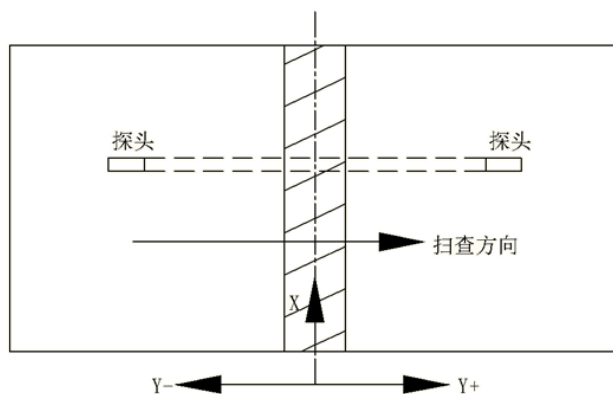


图 1.4.1 (a) 平行扫查

(8) 非平行扫查：

探头运动方向与声束方向垂直的扫查方式，一般指探头对称布置于焊缝中心线两侧沿焊缝长度方向 (X 轴) 运动的扫查方式，见图 1.4.1 (b)。

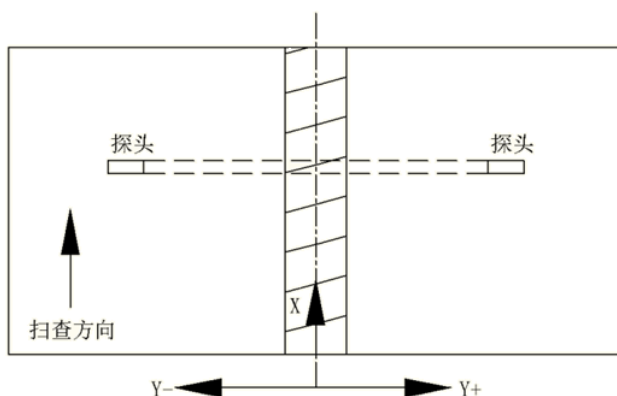


图 1.4.1 (b) 非平行扫查

(9) 偏置非平行扫查：

探头对称中心与焊缝中心线保持一定偏移距离的非平行扫查方式，见图 1.4.1 (c)。

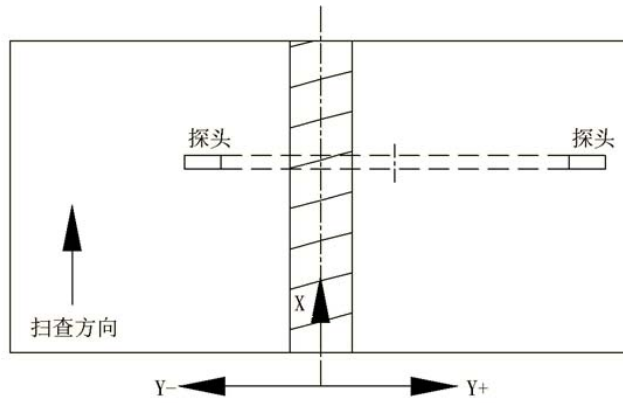


图 1.4.1 (c) 偏置非平行扫查

(10) 斜向扫查:

探头沿 X 轴方向运动，且探头对连线与焊缝中心线成 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 夹角的扫查方式，见图 1.4.1 (d)。

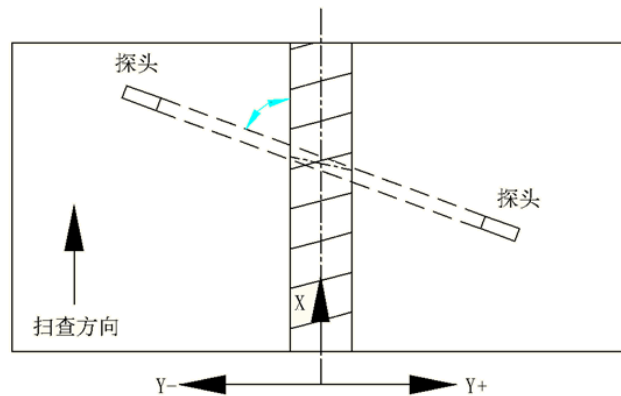


图 1.4.1 (d) 斜向扫查

(11) 扫查面盲区

由于直通波有一定的宽度以及工件外形结构而导致的扫查面无法检测的区域，一般以检测区域内无法检出的扫查面缺陷高度最大值表征。

(12) 底面盲区

非平行扫查或偏置非平行扫查时，因轴偏离引起的底部无法检测的区域，一般以检测区域内无法检出的底面缺陷高度最大值表征。

(13) TOFD 图像

TOFD 数据的二维显示，是将扫查过程中采集的 A 扫描信号连续拼接而成；一个轴代表探头移动距离，另一个轴代表深度，一般用灰度表示 A 扫描信号的幅度。

(14) 相控阵超声检测 (PAUT, Phased Array Ultrasonic Testing)

一种依据设定的聚焦法则对阵列探头各个单元在发射或接收声波时施加不同的时间延迟 (或电压)，通过波束形成实现检测声束的移动、偏转和聚焦等功能的超声检测成像技术。

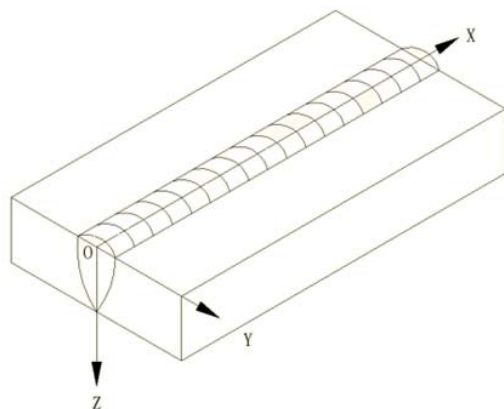
(15) 扇形扫描

用特定的聚焦法则激发相控阵探头中的部分相邻或全部晶片，使激发晶片组形成的声束在设定的角度范围内以一定的步进值变换角度扫过扇型区域的一种扫描方式。

(16) 聚焦法则

通过控制激发晶片数量，以及施加到每个晶片上的发射和接收延时，实现波束的偏转和聚焦的算法或相应程序。

- (17) 探头位置指探头前端距离焊缝中心线的距离。
- (18) 扫查增量系指在扫查方向上，连续数据采集点之间的距离。
- (19) 扫描增量特指扇形扫描时两相邻波束之间的角度差或线形扫描时两相邻波束之间的位置差。
- (20) 相关显示系指检测图像中，由缺陷引起的显示。
- (21) 非相关显示系指检测图像中，由于工件结构或者材料冶金成分的偏差引起的显示
- (22) 坐标定义
- 规定检测起始参考点 O 点以及 X、Y 和 Z 坐标的含义，见图 1.4.1 (e)。



说明：

- O—设定的检测起始参考点
 Y—沿焊缝宽度方向的坐标
 X—沿焊缝长度方向的坐标
 Z—沿焊缝厚度方向的坐标

图 1.4.1 (e) 坐标定义

1.5 检测机构及人员

1.5.1 从事 TOFD 及 PAUT 检测的机构应具有 CCS 认可的 NDT 机构资质。

1.5.2 检测人员应获得 CCS 认可的 PAUT 或 TOFD 证书，且仅可从事技术资格证书资质范围内的相关检测工作。检测人员应通过本指南 2.3.3 中规定的工艺验证活动证明其熟悉工艺要求以及检测设备。

1.5.3 持有 TOFD I 级或 PAUT I 级专项技术资格的人员，可按照工艺规程和操作指导书调整和操作设备、执行现场检测和记录。

1.5.4 持有 TOFD II 级或 PAUT II 级专项技术资格的人员，可制定工艺规程和操作指导书、设置仪器参数、校准、现场数据采集和记录、数据判读及签发报告，指导和监督 I 级人员的操作。

1.5.5 持有 TOFD III 级或 PAUT III 级专项技术资格的人员，可制定、验证和审核工艺规程及作业指导书，解释规范、标准、技术条件和工艺规程，实施、监督 I、II 级人员的工作。

第2章 一般要求

2.1 检测设备及器材

2.1.1 检测设备主机

2.1.1.1 设备主机应具有产品质量合格证或制造厂家出具的合格文件，以及厂家或国家认可的计量部门出具的校准报告，且在校准报告规定的有效期内。

2.1.1.2 TOFD 仪器应至少具有超声波发射、接收、放大、数据采集、记录、显示及分析功能。其应具有足够的通道数以便进行多通道同时检测，且其应至少满足以下性能指标要求：

(1) 发射脉冲可以是单极、双极尖脉冲或方波脉冲，上升时延不超过 0.25 倍的探头标称频率。

(2) 仪器的脉冲宽度应可调，以得到优化的脉冲幅值和脉冲持续时间。脉冲宽度调节的步进量不得大于 10ns。

(3) 仪器的脉冲重复频率应可调，最大值不得小于 500Hz。

(4) 仪器应具有足够的电压，确保检测系统具有足够的灵敏度及信噪比。

(5) 接收器的带宽至少应等于探头的名义带宽，以确保探头的-6dB 带宽没有落在接收器的-6dB 带宽之外。

(6) 系统应具备足够的增益，增益应连续可调且步进值不大于 1dB。

(7) 数字化采样频率至少应为探头标称频率的 8 倍。

(8) 采样位数不小于 8 位。

(9) 至少应具有 256 级灰度编码显示。

(10) A 扫信号的起始延迟应在 0~200 μ s 范围可调，窗口范围在 5~100 μ s 范围可调。

(11) 仪器应具有信号平均功能，最大平均次数不少于 8 次。

(12) 仪器应具有位置编码功能。

(13) 仪器软件应具有深度坐标的线性化计算或深度校准功能。

(14) 仪器能将采集到的所有原始数据以不可更改的方式进行拷贝。

(15) 仪器可以对数据进行软件处理（如直通波同步、直通波去处，SAFT 等），但不得更改原始检测数据。

2.1.1.3 PAUT 仪器应至少具有超声波发射、接收、放大、数据采集、记录、显示及分析功能。

且其应至少满足以下性能指标要求：

(1) 发射脉冲可以是单极或双极的尖脉冲或方波脉冲，上升时延不超过 0.25 倍的探头标称频率。

(2) 仪器的脉冲宽度应可调，以得到优化的脉冲幅值和脉冲持续时间。脉冲宽度调节的步进量不得大于 10ns。

(3) 仪器的脉冲重复频率应可调，最大值不得小于 500Hz。

(4) 仪器应具有足够的电压，确保检测系统具有足够的灵敏度及信噪比。

(5) 接收器的带宽至少应等于探头的名义带宽，以确保探头的-6dB 带宽没有落在接收器的-6dB 带宽之外。

(6) 系统应具备足够的增益，增益应连续可调且步进值不大于 1dB。

(7) 数字化采样频率至少应为探头标称频率的 8 倍。

(8) 采样位数不小于 8 位。

-
- (9) 至少应具有 256 级彩色或伪彩色编码显示。
 - (10) A 扫信号的起始延迟应在 0~200 μ s 范围可调, 窗口范围在 5~100 μ s 范围可调。
 - (11) 仪器应具有位置编码功能。
 - (12) 软件应具有聚焦法则计算功能
 - (13) 软件至少应具有 A, B, C, D, S, E 等视图或成像方式
 - (14) 仪器应具有内部补偿功能, 能进行 ACG 及 TCG/DAC 校准。
 - (15) 推荐具有视频平滑功能
 - (16) 仪器能将采集到的所有原始数据以不可更改的方式进行拷贝。

2.1.2 探头

2.1.2.1 所使用的探头应具有出厂检测报告及合格证。

2.1.2.2 探头检测报告中至少应包含探头的晶片尺寸、中心频率、-6dB 带宽等信息, 相控阵探头还应具有晶片排布方式以及晶片一致性等测试参数。

2.1.3 楔块

2.1.3.1 楔块应具有出厂检测报告。

2.1.3.2 检测报告中应注明楔块设计参数, 如楔块声速, 理论折射角度, 晶片位置等。TOFD 楔块还应在楔块上标明理论波束出射点位置。

2.1.4 扫查装置

扫查装置一般包括探头夹持装置, 导向部分, 驱动部分及位置记录部分。

2.1.4.1 探头夹持部分应能调节探头位置及间距, 并能在扫查时保证探头相对位置不变。

2.1.4.2 导向部分应能使扫查装置按照预先设计的轨迹移动。

2.1.4.3 驱动部分可以采用人工或电机驱动。

2.1.4.4 位置记录部分的记录精度等应能满足本指南对数据采集的要求。

2.1.5 检测设备的组合性能

检测设备组合性能应至少满足以下要求。

- (1) 水平线性误差不大于 1%。
- (2) 垂直线性误差不大于 5%。
- (3) 动态范围不小于 26dB。
- (4) 灵敏度余量不小于 42dB。

2.1.6 耦合剂

2.1.6.1 耦合剂应在操作温度范围内保证稳定可靠的超声特性。

2.1.6.2 耦合剂应对操作人员及环境无害。

2.1.6.3 实际检测采用的耦合剂应与检测系统校准时采用的耦合剂相同。

2.1.7 试块

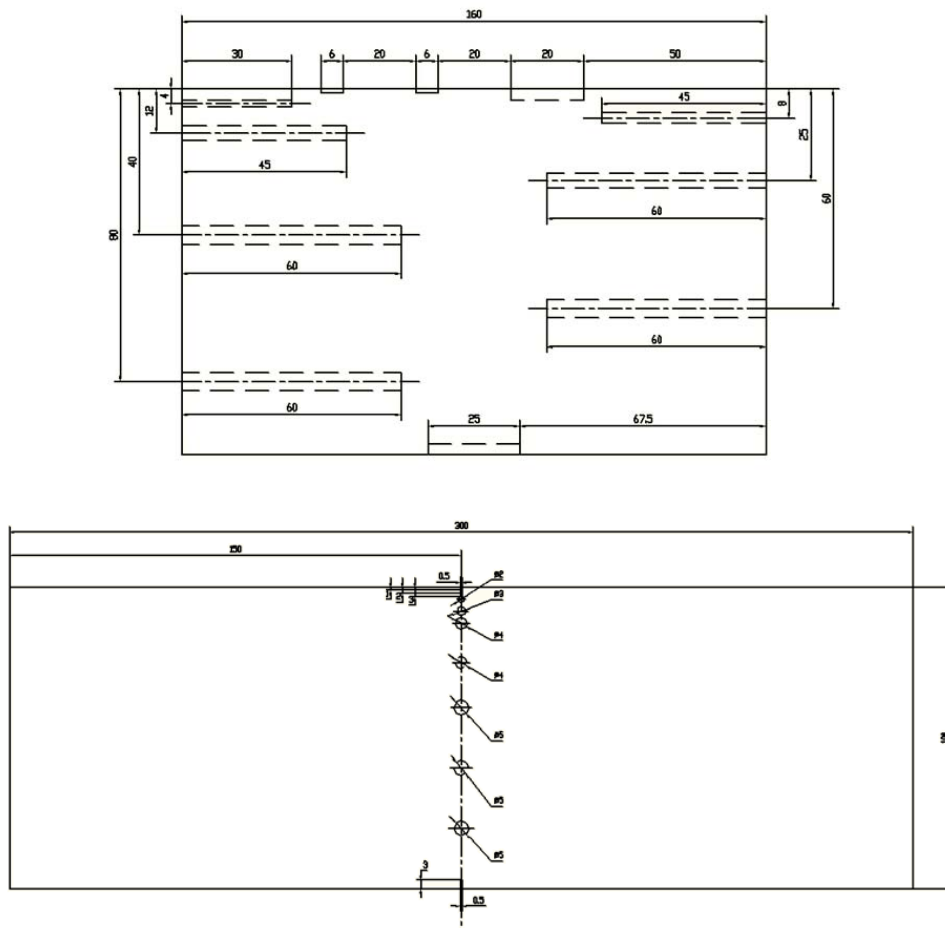
2.1.7.1 标准试块是用于仪器探头性能测试的试块, 本指南中使用的标准试块为 CSK-IA 试块。

2.1.7.2 对比试块指用于灵敏度校准的试块, 其至少应满足下列要求

- (1) 试块材料中超声波束可能通过的区域用直探头检测时, 不得有大于或等于 $\phi 2$ 平底孔当量的缺陷出现。
- (2) 材料的声学性能应与被检工件材料一致或接近。

(3) 当工件表面曲率半径大于或等于 150mm 时，可采用平面校准试块。当工件表面曲率半径小于 150mm 时，应采用曲面校准试块。曲面校准试块的曲率半径应在实际工件曲率半径的 0.9-1.5 倍之间。

(4) 本指南规定的 TOFD 平面对比试块如图 2.2.7.2 (1) 所示。



注：孔误差不大于 $\pm 0.02\text{mm}$ ，开孔垂直度误差不超过 $\pm 0.1^\circ$ ，其它尺寸误差不超过 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

图 2.2.7.2 (1) 平面 TOFD 对比试块

(5) 本指南规定的 PAUT 平面对比试块如图 2.2.7.2 (2) 所示。

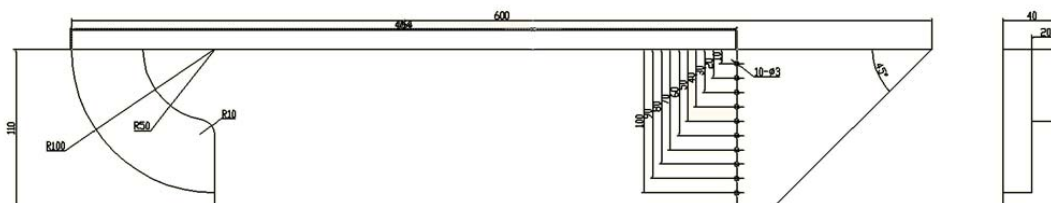


图 2.2.7.2 (2) 平面 PAUT 对比试块

2.1.7.3 模拟验证试块应满足如下要求

(1) 模拟验证试块中的模拟缺陷应为采用实际焊接工艺制备或使用以往检测中发现的

实际缺陷。其厚度应为实际工件的 0.9-1.3 倍，且最大差值不超过 25mm。

(2) 模拟试块中至少应包含上下表面缺陷及内部埋藏缺陷至少各 1 处。分区检测时，应保证每个分区至少有一个缺陷。

(3) 模拟试块中的缺陷应覆盖到横向缺陷，纵向缺陷，体积型缺陷及面积型缺陷等缺陷特征。

(4) 模拟试块中的缺陷，尺寸不应大于相应的 II 级验收要求。

(5) 单个试块未完全包含以上要求缺陷的，可多个试块组合使用。

2.2 仪器的定期校验

2.2.1 仪器设备的水平线性、垂直线性及衰减器线性应周期性进行校验并记录，最长校验周期不超过一年。

2.2.2 TOFD 设备及 PAUT 设备每个独立发射接收通道的衰减器线性应分别进行。

2.2.3 每次系统调试时，应对位置传感器（编码器）的精度进行校准，校准长度应不小于 500mm，误差应不大于 1%。

2.3 检测工艺

2.3.1 总体要求

2.3.1.1 检测前应编写针对具体项目的检测工艺规程，检测工艺规程应按照本规范编写并提交 CCS 认可。当关键因素发生变化时，需修改检测工艺规程并重新提交 CCS 认可。关键因素详见表 2.3.1。

关键因素

表 2.3.1

| 序号 | 相关因素 |
|----|---------------------------|
| 1 | 产品范围（工件形状、规格、材质、壁厚等） |
| 2 | 依据的标准、法规 |
| 3 | 检测设备和器材以及校准、核查、运行核查或检查的要求 |
| 4 | 检测工艺（探头配置、扫查方式、厚度分区等） |
| 5 | 检测前的表面准备要求 |
| 6 | 盲区检测方式及工艺试验报告 |
| 7 | 横向缺陷检测方式及工艺试验报告 |
| 8 | 检测数据的分析和解释 |
| 9 | 缺陷评定与质量分级 |

2.3.2 检测工艺卡

2.3.2.1 应按照批准的检测工艺文件编写针对不同结构的检测工艺卡，检测人员应按照检工艺卡的要求对具体结构进行检测，验船师应按照工艺卡的内容对现场操作进行监督。检测工艺卡至少应包含以下内容：

(1) 执行标准，验收等级，检测时机，检测比例，表面要求。

(2) 仪器，探头，试块的型号及生产序列号

(3) 楔块, 扫查器, 耦合剂名称

(4) 扫查面, 探头参数及分布, 仪器灵敏度设置, 扫查增量, 扫描增量, 脉冲重复频率, 信号平均, 视频平滑, 分区及波束覆盖范围, 扫查方式, 扫查速度, 横向缺陷检测方案 (需要时),

(5) 检测标识要求, 检测操作程序

(6) 数据记录要求

2.3.3 工艺验证要求

2.3.3.1 工艺验证应由我社验船师现场见证。

2.3.3.2 应使用拟投入实际生产的检测设备及人员, 以及事先设计好的检测工艺在 2.1.7.3 规定的模拟试块上进行操作及数据判读演示。

2.3.3.3 工艺验证时应使用实际检测所使用的工艺参数及设置, 检测结果符合如下要求时视为验证通过。

(1) 检测数据合格有效;

(2) 能够检测出试块中所有预期检测到的缺陷;

(3) 按照工艺文件规定的测量方法对缺陷进行定量时, 不应小于缺陷实际尺寸。

第3章 检测工艺参数的选择和设置

3.1 检测区域

3.1.1 检测区域

3.1.1.1 检测区域应包含焊缝和热影响区。热影响区宽度按相应工艺认可实测数据或两侧熔合线外各 10mm 的区域（取大者），如图 3.1.1 所示。

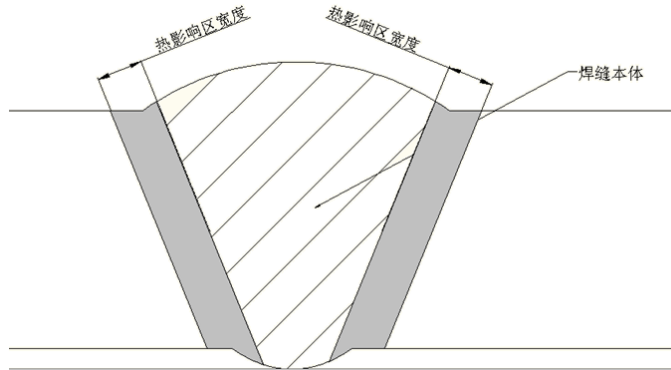


图 3.1.1 检测区域

3.1.1.2 任何情况下，均需保证 TOFD 及 PAUT 检测联合检测时能完整覆盖检测区域，否则，应增加补充检测。

3.2 检测工艺设计

3.2.1 检测工艺

检测时，应使用非平行扫查方式进行 TOFD 检测，并进行单面双侧的 PAUT 检测。两种检测方式可同时进行或分别进行。

3.2.2 不等厚对接焊缝检测

不等厚对接焊缝的检测可参照附录 A 中的规定执行。

3.2.3 TOFD 设置

进行 TOFD 检测时，可参照表 3.2.3 选择探头及划分检测分区。

TOFD 检测分区及探头选择推荐表 表 3.2.3

| 工件厚度(t) mm | 厚度分区数 | 深度范围 mm | 标称频率 MHz | 声束角度 α ($^{\circ}$) | 晶片直径 mm |
|---------------------|-------|------------|-------------|---------------------------------|------------|
| $30 \leq t \leq 50$ | 1 | 0~t | 5~3 | 70~60 | 3~6 |
| $50 < t \leq 100$ | 2 | 0~0.4t | 7.5~5 | 70~60 | 3~6 |
| | | 0.4t~t | 5~3 | 60~45 | 6~12 |

3.2.4 PAUT 设置

3.2.4.1 PAUT 检测时，探头频率应在 2MHz-5MHz 之间。

3.2.4.2 PAUT 检测应使用扇形扫描，扇形扫描的主波束应完整覆盖 TOFD 技术的检测盲区。可使用波束覆盖仿真软件或通过绘图方式确认 PAUT 探头的位置及波束覆盖范围，TOFD 检测盲区可按理论公式进行计算或通过实测予以确认。

3.2.5 横向缺陷检测

当考虑横向缺陷检测时，可增加专门的 TOFD 斜向扫查。

第4章 检测要求

4.1 总体要求

4.1.1 检测时机

- 4.1.1.1 如果需要进行热处理，那么检测工作应在热处理完成之后进行。
- 4.1.1.2 检测工作至少应在焊接完成 24 小时以后进行。
- 4.1.1.3 对最小屈服强度大于或等于 420N/mm^2 的淬火回火钢，焊缝的无损检测应在焊后 48h 以后进行。

4.1.2 检测面要求

- 4.1.2.1 检测面探头移动区域应打磨平顺，并清除焊接飞溅、铁屑、油污及其他影响声能传播的杂质。
- 4.1.2.2 对于打磨的表面，其表面粗糙度 Ra 应不大于 $12.5\mu\text{m}$ ；
- 4.1.2.3 当检测面存在较大的凹坑，应经过补焊并将补焊区域修磨至与临近母材平齐。

4.1.3 母材检测

- 4.1.3.1 重要工件检测时，应使用直探头对可能影响检测声束传播的母材区域进行检测，以识别母材中可能存在的缺陷对检测结果的影响。同样，若检测人员对检测结果有疑问时，也可使用上述方法。
- 4.1.3.2 直探头进行母材检测时，至少显示两次工件底波，将无缺陷处的二次底波调整到满刻度的 100%，作为检测灵敏度。对于缺陷信号幅度超过 20%或底波消失的区域，应在工件表面做出标记，并予以记录。

4.1.4 温度

- 4.1.4.1 当使用普通探头及耦合剂时，工件表面温度应在 $0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，否则，应使用特殊探头及专用耦合剂。
- 4.1.4.2 检测校准与实际备检工件表面温度变化应在 20°C 以内。

4.1.5 扫查标记要求

- 4.1.5.1 检测位置应根据焊缝、结构等信息给出永久性参考位置，方便数据的可追溯及可重复性。
- 4.1.5.2 焊缝的扫查方向应制订专门的规则，例如甲板焊缝从左舷向右舷，舷侧焊缝从上向下，纵缝从船头向船尾等。以上内容应在检测工艺中予以明确。
- 4.1.5.3 扫查时，应根据焊缝中心线绘制扫描位置参考线，并标明扫查方向，以保证探头沿预期的扫查计划运动。

4.2 仪器设置

4.2.1 扫查增量

扫查增量应设置为 1mm。

4.2.2 扫查速度

扫查速度应小于或等于最大扫查速度 V_{\max} ，最大扫查速度可按下式进行计算。

$$V_{\max} = \frac{PRF}{n_p + N \times n_t} \Delta X$$

式中：

V_{\max} —最大扫查速度，mm/s；

PRF —激发探头的脉冲重复频率，Hz；

ΔX —设置的扫查增量值，mm；

N —设置的信号平均次数。

n_p —— PAUT 波束数量

n_t —— TOFD 波束数量

4.2.3 显示时间窗口设置

4.2.3.1 当使用单通道 TOFD 进行检测时，其时间窗口的起始位置应设置到直通波前 $0.5\mu s$ 以上，底面一次波形转换信号后 $0.5\mu s$ 以上。

4.2.3.2 当进行 TOFD 分区检测时，第一个分区的 A 扫描信号应显示到直通波前 $0.5\mu s$ ；最后一个分区显示终止应设置到底面反射回波后 $0.5\mu s$ ；中间分区与邻近分区之间显示范围应至少保证深度方向上有 25% 的重合。

4.2.3.3 当进行 PAUT 检测时，显示范围至少应包含所关注的检测区域。

4.2.4 PAUT 聚焦设置

4.2.4.1 PAUT 扇形扫描时的角度步进应不大于 1° 。

4.2.4.2 推荐 PAUT 扇形扫描以深度为基准进行聚焦，当仅使用 1 次波时，聚焦深度应设置为 $1.2t$ ；当同时使用一二次波或仅使用二次波时，聚焦深度应设置为 $2.2t$ ，其中 t 为母材标称厚度。

4.2.4.3 为改善成像质量，推荐用动态深度聚焦（DDF）功能。

4.2.5 扫查覆盖及数据记录长度

4.2.5.1 若对焊缝在长度方向上分段扫查，则各段扫查区域应至少有 20mm 的重叠，对于环焊缝，则扫查停止位置应越过起始位置至少 20mm。

4.2.5.2 实际检测时仪器设定的数据记录长度应大于实际扫查长度 20-30mm。

4.3 TOFD 系统调试

4.3.1 TOFD 灵敏度设定

4.3.1.1 TOFD 进行单通道检测时，可直接在工件表面设定灵敏度。设定时，将无缺陷部位的直通波信号调整至满屏高度的 40%-80%，作为基准灵敏度。

4.3.1.2 进行多通道 TOFD 检测时，应使用对比试块调整检测灵敏度。将试块上较弱的衍射波信号调整至满屏高的 40%-80% 作为基准灵敏度。

4.3.1.3 设置完灵敏度后，仪器的电噪声信号不允许大于满屏高度的 5%。

4.3.2 TOFD 深度校准

检测前，应按照 PCS 及声速对 TOFD 检测系统进行深度校准，需要时还应进行深度修正，校准及修正后，其在试块上的深度显示误差应不大于 0.2mm。

4.3.3 耦合补偿修正

4.3.3.1 当使用试块调整灵敏度时，实际检测灵敏度应在基础灵敏度基础上增加耦合补偿，修正值应通过实测得出。

4.3.3.2 当直接在实际工件上调整灵敏度时，则无需进行耦合补偿。

4.4 PAUT 系统调试

4.4.1 总体要求

相控阵超声检测调试及校准包括探头晶片检查，被检材料声速测试、楔块延迟校准、灵敏度校准，TCG 曲线的添加。

4.4.2 晶片检查

每次系统调试时，应对探头拟使用的晶片进行检查，探头应满足以下要求：

(1) 拟使用晶片组中晶片损坏不大于 10%，且不允许相邻晶片损坏。

(2) 拟使用晶片间的灵敏度偏差不大于 6dB，且相邻晶片间的灵敏度偏差不大于 3dB，偏差大于 6dB 的晶片，按照损坏晶片统计。

4.4.3 楔块延迟校准

应使用对比试块上的圆弧对声速及楔块延迟进行校准。校准后，设备在试块上 3mm 孔的深度及水平定位精度误差不大于 1mm。

4.4.4 灵敏度及 TCG 校准

应使用对比试块上的横通孔对 PAUT 系统进行灵敏度及 TCG 校准。校准后，检测范围内各位置的波幅一致性误差不大于±5%满屏高。

4.4.5 耦合补偿修正

4.4.5.1 当使用试块调整灵敏度时，实际检测灵敏度应在基础灵敏度基础上增加耦合补偿，修正值应通过实测得出。

4.5 检测实施

4.5.1 扫查偏离

4.5.1.1 TOFD 检测过程中，实际扫查路径与理论扫查路径之间的偏差不应大于探头中心间距的 10%，TOFD 的扫查偏离可见图 4.5.1 中的描述。

4.5.1.2 PAUT 检测时，实际扫查路径的与理论扫查路径之间的偏差不应造成波束覆盖的不完整，也不应带来过大的定位误差。

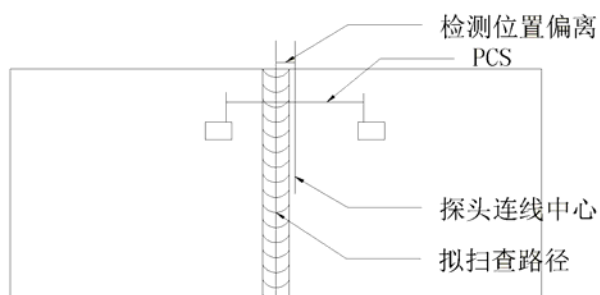


图 4.5.1 TOFD 扫查偏离示意图

4.5.2 系统校验

4.5.2.1 系统校验应在每班次检查开始前及结束后进行，若连续工作时间较长，还应每 4 小时校验一次。

4.5.2.2 系统硬件改变后应进行系统校验。

4.5.2.3 系统校验时应与初次灵敏度设置时使用相同的试块，并去除耦合补偿。如直接在工件表面设置灵敏度，则校验时应在与初次设置灵敏度相同的位置。

4.5.3 扫查长度

单次扫查长度不应超过 2m。

4.5.4 偏差处理

4.5.4.1 当检测系统出现较大偏差时，应重新调整检测系统并对之前的检测位置进行重新检测，详见表 4.5.3 中的规定。

允许的最大偏移及处理办法

表 4.5.4

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 灵敏度 | |
| 灵敏度偏离不大于 6dB | 无需注意，在数据分析时使用软增益做适当调整 |
| 灵敏度偏离大于 6dB | 需要重新调整设置，且在此前最后一次有效校验之后的检测均需重新进行 |
| 显示位置 | |
| 位置偏离不大于 0.5mm 或 2%深度范围(取大者) | 无需注意 |
| 位置偏离大于 0.5mm 或 2%深度范围(取大者) | 需要重新调整设置，且在此前最后一次有效校验之后的检测均需重新进行 |
| 编码器 | |
| 500mm 内误差不超过 1% | 无需注意 |
| 500mm 内误差超过 1% | 需要重新调整编码器，且在此前最后一次有效校验之后的检测均需重新进行 |

第 5 章 检测数据分析及判读

5.1 数据有效性评价

5.1.1 数据要求

合格的数据应同时满足以下要求，如数据不合格，应重新进行采集

- (1) 数据 A 扫描的显示范围符合 4.2.3 中的要求。
- (2) 数据采集的长度与实际焊缝长度一致。
- (3) 数据丢失不应超过总数据量的 5%，且不允许相邻数据连续丢失。
- (4) 扫查范围内不允许出现特征波降低 12dB 以上，PAUT 检测时整个扫查长度内不允许出现明显的背景噪声降低或其他耦合不良特征。

5.2 相关显示及非相关显示

5.2.1 总体要求

应根据结构，焊缝状态等信息区分相关显示及非相关显示。

5.2.2 TOFD 缺陷分类

TOFD 技术检测时，相关显示可分为表面开口型缺陷及埋藏型缺陷。

5.2.2.1 表面开口型缺陷可细分为扫查面开口型缺陷，底面开口型缺陷及贯穿型缺陷。在 TOFD 测中，表面开口型缺陷一般会带来直通波或底面反射波的变形或断开，且在图像中只显示下尖端或上尖端的信号。其中下尖端信号相位与直通波相同，而上尖端信号相位与直通波相反。

5.2.2.2 在 TOFD 检测中，埋藏型缺陷按照其成像形态可分为点状缺陷，线状缺陷及条状缺陷，其一般不影响直通波或底面反射波。

5.2.3 典型 TOFD 图像

典型的 TOFD 缺陷图像可参见附录 B。

第6章 缺陷评定与质量分级

6.1 总体要求

6.1.1 总则

焊缝质量分 1、2、3 三个级别，要求由高到低。其中，1 级适用于船舶重要区域，2 级适用于除重要区域之外的其他区域。重要区域详见附录 C。

6.1.2 缺陷评定总体要求

6.1.2.1 主要依照 TOFD 检测结果对缺陷进行评定。当 TOFD 及 PAUT 同时检测到同一个缺陷时，PAUT 可作为辅助定位及定性的工具。

6.1.2.2 当 TOFD 及 PAUT 检测到同一缺陷且 PAUT 信号显示完整时，使用 PAUT 数据进行定位，TOFD 图像进行定量。

6.1.2.3 当 PAUT 检测到 TOFD 检测结果未显示的缺陷时，以 PAUT 数据为依据对缺陷进行定位、定量及定性。

6.2 TOFD 缺陷评定

6.2.1 缺陷长度测量

6.2.1.1 缺陷长度指缺陷在 X 轴投影间的距离，见图 6.2.1 中 l 。

6.2.1.2 TOFD 测长时，应使用抛物线型拟合指针对缺陷在 X 轴上的起始位置及结束位置进行测量，缺陷的起始位置记录为缺陷位置，结束位置与起始位置之间的差值记录为缺陷长度。

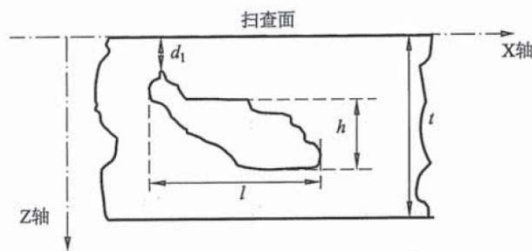


图 6.2.1 TOFD 中长度、深度及自身高度示意

6.2.2 缺陷深度测量

6.2.2.1 缺陷深度指缺陷上端点与扫查面间的最短距离，见图 6.2.1 中 d_1 。

6.2.2.2 对于无法分辨自身高度的缺陷而言，缺陷深度指缺陷显示与扫查面之间的距离。

6.2.2.3 对于具有自身高度的缺陷，缺陷深度为缺陷上端点与扫查面之间的距离。

6.2.2.4 扫查面开口缺陷的深度为 0。

6.2.3 缺陷自身高度测量

6.2.3.1 缺陷自身高度指沿 X 轴方向的某位置，缺陷在 Z 轴投影间的距离最大值，见图 6.2.1

中 h。

6.2.3.2 对于表面开口缺陷而言，缺陷自身高度指缺陷上端点（下端点）距离底面（扫查面）的最大距离。

6.3 PAUT 缺陷评定

6.3.1 缺陷长度测量

6.3.1.1 应使用 6dB 法或端点 6dB 法对缺陷的起始位置及结束位置进行测量。起始位置记录为缺陷位置，起始位置与结束位置之间距离的差值记录为缺陷长度。

6.3.1.2 当缺陷信号只有一个波峰时，采用 6dB 法进行测量；当缺陷信号有多个波峰时，采用端点 6dB 法进行测量。波幅超过仪器记录能力的饱和信号均按照 100%满屏高计算。

6.3.2 缺陷深度及水平位置测量

6.3.2.1 缺陷最高波幅在 Z 轴方向上的位置及其在 Y 轴方向上的位置定义为缺陷深度及水平位置。见图 6.3.2。

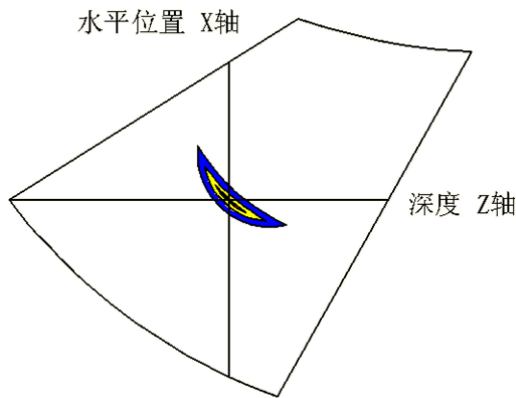


图 6.3.2 PAUT 中缺陷深度及水平位置

6.4 质量分级

6.4.1 总体要求

应结合 PAUT 以及 TOFD 检测的结果对缺陷性质进行判断。

6.4.4.1. 任何被认为可能是裂纹、未熔合、未焊透等危害性的缺陷均评为 3 级。

6.4.4.2. 所有横向缺陷均评定为 3 级。

6.4.2 TOFD 单个缺陷质量分级

TOFD 检测出的非危害性单个缺陷应按照表 6.4.2 要求进行评级。

TOFD 检测质量分级

表 6.4.2

| 验收级 别 | ISO5817 质量级别 | 母材厚度范 围 (mm) | 当 $h < h_2$ 或 h_3 时的最大 允许长度 | 当 $L \leq L_{max}$ 时最大允许 高度 | | 当 $L \geq L_{max}$ 时最大允许 高度 h_1 |
|----------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|------|---|
| | | | | 表面开口 | 埋藏型缺 | |
| | | | | | | |

| | | | Lmax (mm) | 缺陷 h3 (mm) | 陷 h2 (mm) | (mm) |
|-----|-----------|----------|-----------|---------------|--------------|------|
| 1 级 | B 级 | 30<t≤50 | 0.75t | 2 | 3 | 1 |
| | | 50<t≤100 | 40 | 2.5 | 4 | 2 |
| 2 级 | C 级 | 30<t≤50 | t | 2 | 4 | 1 |
| | | 50<t≤100 | 50 | 3 | 5 | 2 |
| 3 级 | 超过 2 级限值者 | | | | | |

* 当采用本指南以外的验收标准时，须经 CCS 认可。

6.4.3 PAUT 单个缺陷质量分级

PAUT 检测时，波幅超过 $\emptyset 3-14\text{dB}$ 的回波均应进行分析，所有波幅超过记录水平的缺陷均应记录并按表 6.4.3 进行评级。

PAUT 检测质量分级

表 6.4.3

| 验收级别 | ISO 5817 质量级别 | ISO11666 质量级别 | 缺陷波高 | 缺陷长度 | 记录水平 |
|------|------------------|------------------|--|-----------------------|---------------------------|
| 1 级 | B 级 | 2 级 | $\emptyset 3-4\text{dB} \sim \emptyset 3$ | 不大于 0.5t 或 20mm (取小者) | $\emptyset 3-4\text{dB}$ |
| | | | $\emptyset 3-10\text{dB} \sim \emptyset 3-6\text{dB}$ | 不大于 t 或 20mm (取小者) | $\emptyset 3-10\text{dB}$ |
| | | | $\emptyset 3-14\text{dB} \sim \emptyset 3-10\text{dB}$ | 不大于 2.5t 或 20mm (取小者) | $\emptyset 3-14\text{dB}$ |
| 2 级 | C 级 | 3 级 | $\emptyset 3 \sim \emptyset 3+4\text{dB}$ | 不大于 0.5t 或 30mm (取小者) | $\emptyset 3$ |
| | | | $\emptyset 3-6\text{dB} \sim \emptyset 3-2\text{dB}$ | 不大于 t 或 30mm (取小者) | $\emptyset 3-6\text{dB}$ |
| | | | $\emptyset 3-10\text{dB} \sim \emptyset 3-6\text{dB}$ | 不大于 2.5t 或 30mm (取小者) | $\emptyset 3-10\text{dB}$ |
| 3 级 | 超过以上限值者 | | | | |

* 当采用本指南以外的验收标准时，须经 CCS 认可。

6.4.4 临近缺陷的判别要求

6.4.4.1 当 TOFD 检测时，相邻缺陷沿焊缝长度方向的间距小于其中较长的缺陷长度 l，且在深度方向上间距小于自身高度较大的缺陷高度 h 时，当作单个缺陷处理，该缺陷的长度 lg 为两个缺陷长度之和加上缺陷间距。若两缺陷在长度方向上存在重叠，则自身高度为两个缺陷的自身高度加上间距 (hg)；若两缺陷在长度方向上不重叠，则缺陷的自身高度按两缺陷中自身高度较大者计算 (h'g)。如图 6.4.4.1 所示。

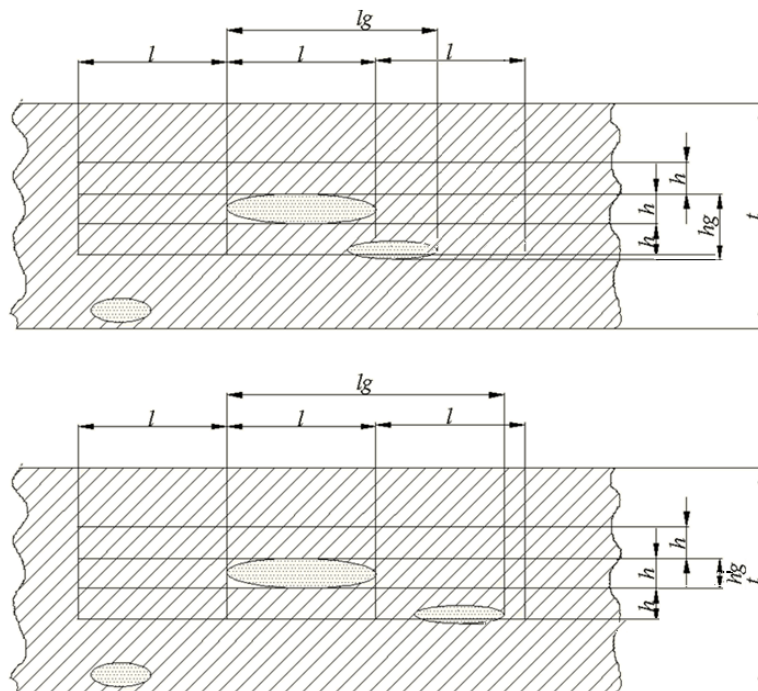


图 6.4.4. 1TOFD 检测时的临近缺陷

6.4.4.2 当 PAUT 检测时，相邻缺陷在扫查方向上的距离 d_x 小于较长缺陷的长度 l_1 的 2 倍，且两缺陷在水平位置、深度位置上的投影距离均小于 10mm 时，该缺陷作为单个缺陷处理，缺陷长度 l_{12} 为相邻缺陷自身的长度加上间距。如图 6.4.4.2 所示。

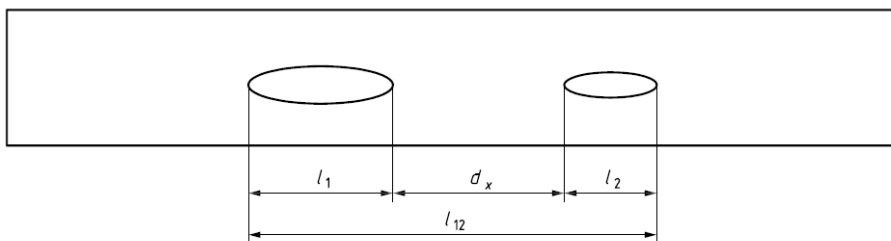


图 6.4.4.2 PAUT 检测时的临近缺陷

6.4.5 累计缺陷计算

6.4.5.1. TOFD 检测时，对于单个不超过规定限值的缺陷，应进行累计缺陷长度的计算。在任意 12t 范围内缺陷累计长度应按照表 6.4.6 的规定进行质量评级。

TOFD 累计缺陷长度的评级 表 6.4.5.1

| 验收级别 | ISO5817 质量级别 | 累计缺陷验收要求 |
|------|--------------|----------------|
| 1 级 | B 级 | 3.5t, 最大 150mm |
| 2 级 | C 级 | 4t, 最大 200mm |
| 3 级 | 超过以上限值者 | |

6.4.5.2 PAUT 检测时，所有波幅超过记录线水平的缺陷应进行缺陷累计长度的计算，在任意

100mm 范围内缺陷累计长度应按照表 6.4.5.2 的规定进行质量评级。

PAUT 累计缺陷长度的评级

表 6.4.5.2

| 验收级别 | ISO5817 质量级别 | ISO11666 质量级别 | 累计缺陷验收要求 |
|------|--------------|---------------|----------|
| 1 级 | B 级 | 2 | 20mm |
| 2 级 | C 级 | 3 | 30mm |
| 3 级 | 超过以上限值者 | | |

6.4.6 点状缺陷

对所有的验收级别而言，任意 150mm 长度内的点状缺陷均不应超过 $1.2t$ ，其中 t 的单位为毫米。例如，对于母材厚度为 50mm 的焊缝，在任意 150mm 长度内，点状缺陷的数量应不大于 60 个。

6.4.7 长度折算

计算累计长度或点状缺陷时，若焊缝长度不足 $12t$ 或 150mm，则相应验收标准应按比例折算，当折算后的累计长度限值小于单个缺陷限值时，以单个缺陷限值为准。

第7章 检测记录及报告

7.1 检测记录及报告

7.1.1 检测报告

检测报告中应至少包含本节中规定的内容。

- 7.1.1.1 被检工件细节，包括工程名称、被检工件的名称、规格、材料、状态、焊缝坡口形式等。
- 7.1.1.2 硬件名称，包括主机名称及识别号、探头名称及识别号、编码器识别号、试块名称及识别号等。
- 7.1.1.3 参数设置内容，包括参考标准、检测级别、灵敏度设置方法、探头晶片尺寸（TOFD）、楔块角度（TOFD）、PCS 值（TOFD）、平均次数（TOFD）、探头频率（TOFD 及 PAUT）、探头孔径（PAUT）、楔块角度（PAUT）、扫描类型（PAUT）、角度范围（PAUT）、扫描增量（PAUT）、探头相对于焊缝的位置（PAUT）、焊缝波束覆盖示意图（PAUT）、编码器分辨率、试块验证数据等。
- 7.1.1.4 检测内容，包括设置名称、检测类型、检测时机、表面状况、耦合剂、检测温度、扫描增量、检测位置及编号方式、检测方向、检测人员姓名及签名、级别、证书编号及检测日期等。
- 7.1.1.5 缺陷评定，包括使用的数据判读软件名称及版本、参考标准、验收级别、返修次数、所使用的数据处理功能、缺陷位置、缺陷长度、缺陷深度（TOFD 及 PAUT）、缺陷自身高度（TOFD）、缺陷距焊缝中心线距离（PAUT）、合格与否、超标缺陷的扫描图像、数据判读人员姓名及签名、级别及日期。

7.2 检测数据的保存及归档

7.2.1 检测数据的保存

- 7.2.1.1 检测数据应在专门的存储介质中长期保存。
- 7.2.1.2 检测报告纸质版应由编写人员及审核人员签字后长期保存。
- 7.2.1.3 检测数据及检测报告的保存期限不得小于船舶及产品的使用期。

附录 A 不等厚对接焊缝的检测

A1 从平齐面进行检测

A1.1 当条件允许时，应尽可能从平齐一面进行检测，如图 A1.1 (a) 及图 A1.1 (b) 所示。

A1.2 TOFD 检测设置与检测等厚对接焊缝设置方法一致，设计工艺时板厚选取薄侧板厚。

A1.3 PAUT 检测时，厚板一侧由于削斜存在，不宜进行二次波检测，应主要以一次波覆盖下表面为主；薄板一侧应使用一次波及二次波分别对底面及扫查面区域进行覆盖。

A1.4 检测应按照本指南正文部分要求进行。

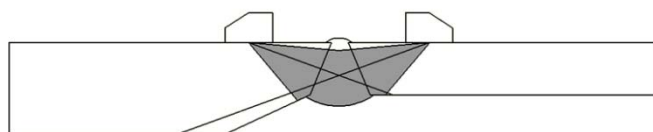


图 A1.1 (a) 从平齐一面进行 TOFD 检测

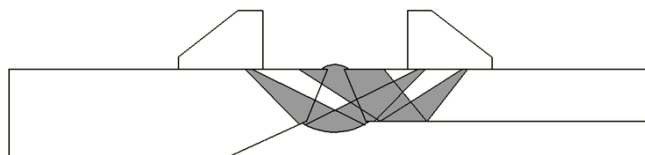


图 A1.1 (b) 从平齐一面进行 PAUT 检测

A2 从削斜面进行检测

A2.1 当仅能从削斜面进行检测时，可从削斜斜面或平面进行检测，如图 1.2 (a) 所示。

A2.2 当从削斜面进行 TOFD 检测时，会导致 TOFD 检测盲区增大，定位及定量误差增大。

A2.3 应至少从平面侧进行一二次波的 PAUT 检测，如图 1.2 (b) 所示。

A2.4 PAUT 应完整覆盖 TOFD 检测的盲区，该盲区尺寸应制作专门的盲区试块予以实测。



图 1.2 (a) 从削斜面进行 TOFD 检测



图 A1.2 (b) 从削斜面进行 PAUT 检测

A3 检测方案需通过本指南 2.1.7.3 中模拟试块的验证。

附录 B 典型 TOFD 成像及缺陷测量方法

B1 典型的数据质量问题

B1.1 增益设置不当

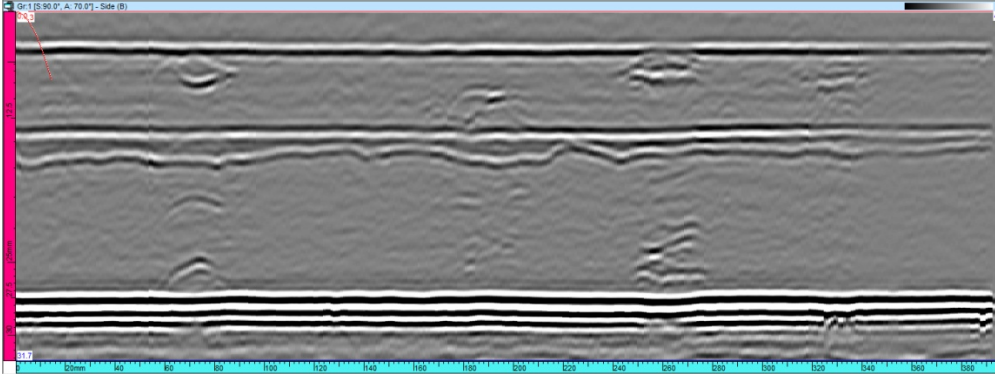


图 B1.1 (a) TOFD 检测 B 扫描图像 (增益适当)

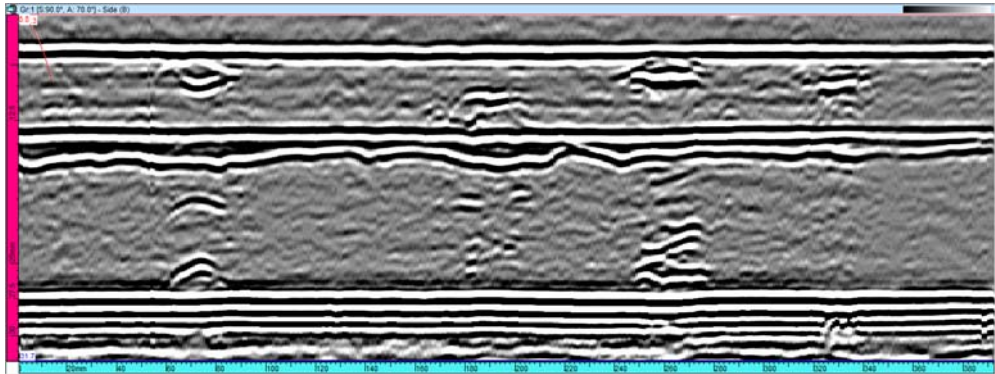


图 B1.1 (b) TOFD 检测 B 扫描图像 (增益过高)

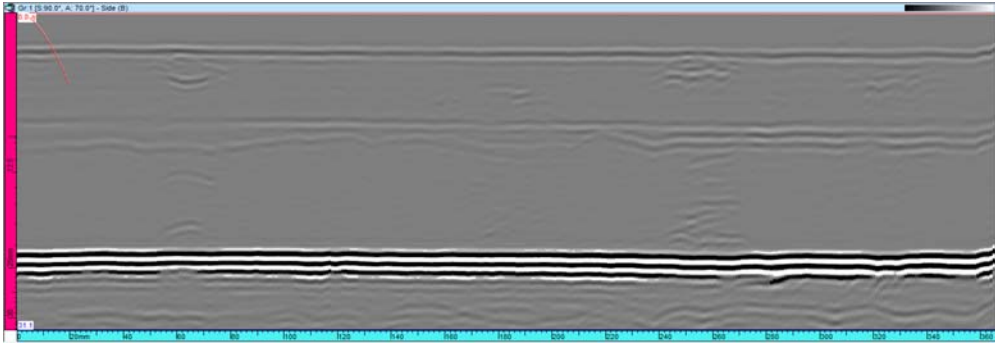


图 B1.1 (c) TOFD 检测 B 扫描图像 (增益过低)

B1.2 显示范围不当

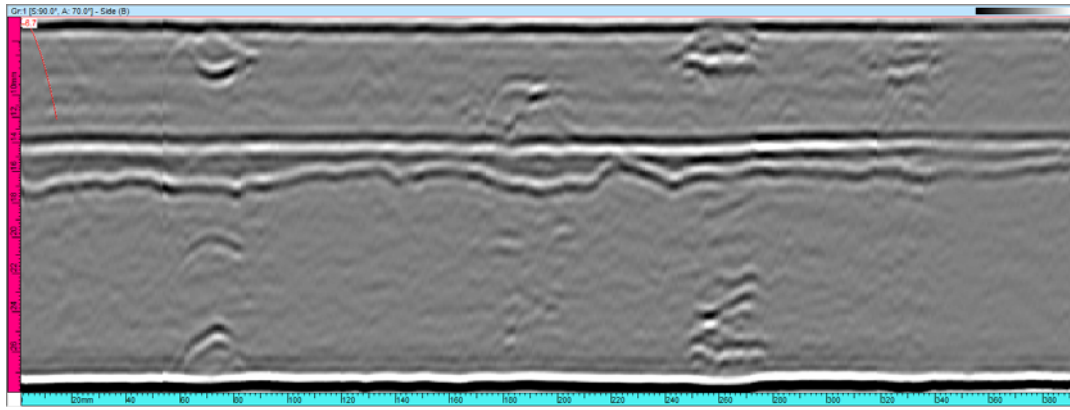


图 B1.2 显示范围设置不当（直通波和波型转换信号不完整）

B1.3 时基同步异常

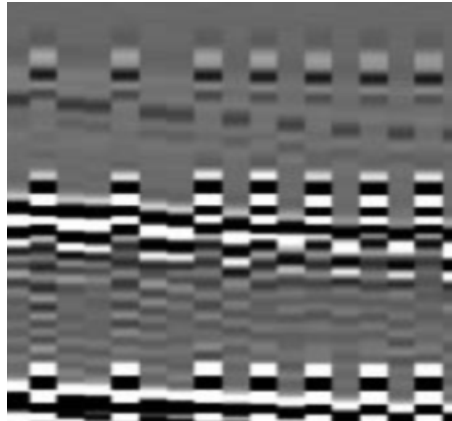


图 B1.3 时基同步异常

B1.4 数据丢失及耦合不良

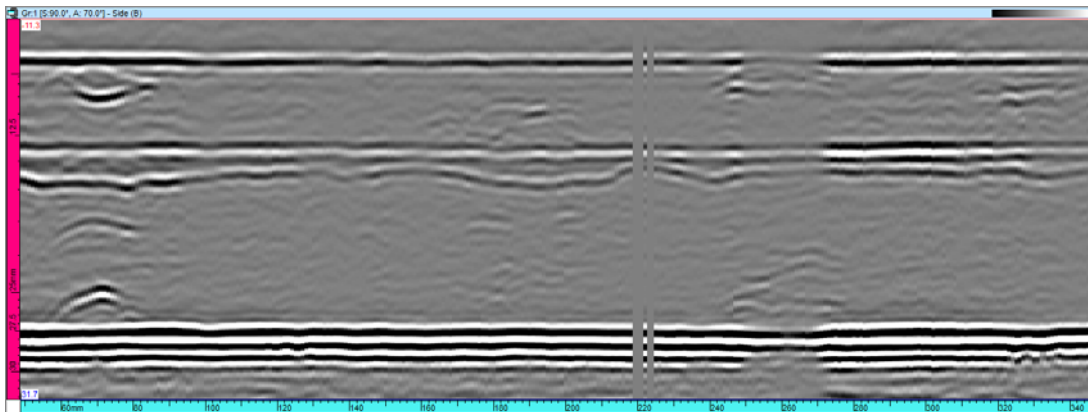


图 B1.4 数据丢失及耦合不良

B1.5 耦合层厚度变化

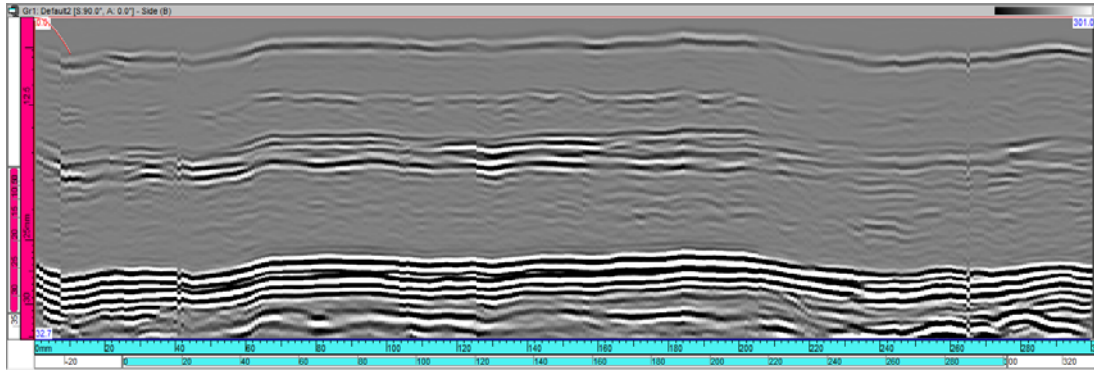


图 B1.5 耦合层厚度变化引起直通波起伏

B2 TOFD 图像中缺陷的基本特征

B2.1 扫查面开口缺陷

B2.1.1 较大的扫查面开口缺陷会造成直通波的明显断开，且在直通波断开位置出现与直通波相位相同、时间滞后的缺陷下尖端信号；

B2.1.2 当扫查面开口缺陷较小时，也可能表现为直通波下凹。

B2.1.3 局部耦合变化也会引起 TOFD 图像中直通波的下凹，但其底面反射波在相同位置也会产生类似的变化。

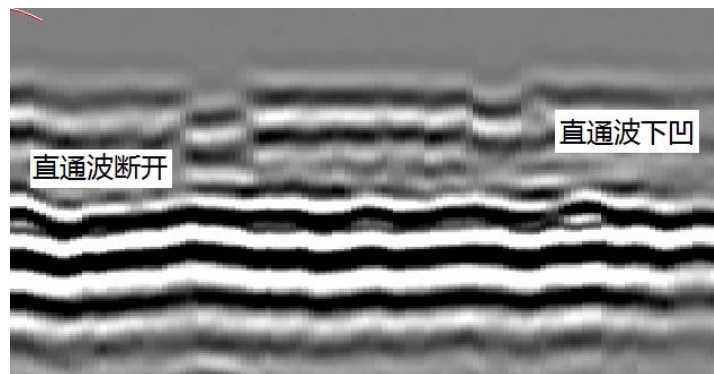


图 B2.1 (a) 扫查面开口缺陷

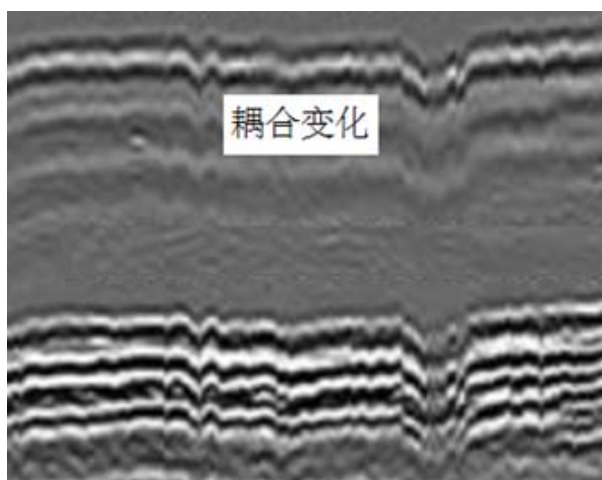


图 B2.1 (b) 耦合变化

B2.2 底面开口缺陷

B2.2.1 较大的底面开口缺陷会造成底面反射波波断开，同时在直通波与底面反射波之间产生与直通波相位相反的缺陷上尖端信号。

B2.2.2 一般情况下，底面开口缺陷不易造成底面反射波断开，但会使其减弱或产生扰动，并出现缺陷上尖端衍射信号。

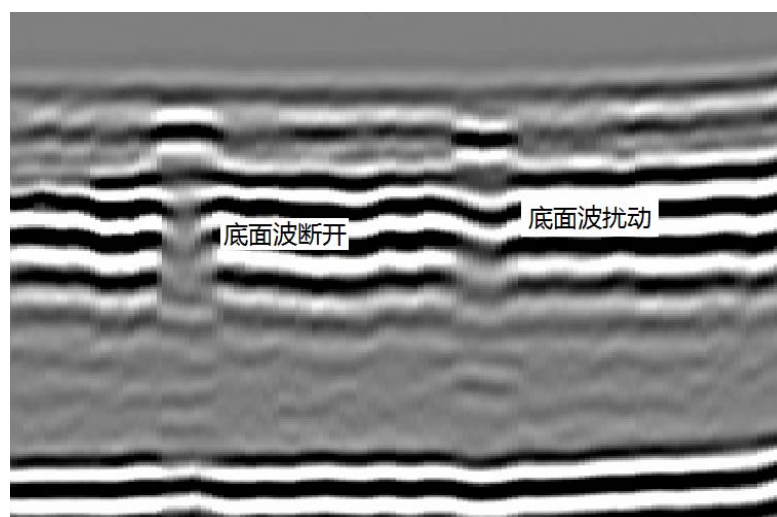


图 B2.2 底面开口缺陷

B2.3 贯穿型缺陷（两面开口）

B2.3.1 贯穿型缺陷的主要特征是直通波及底波的同时减弱或消失，有时可沿深度方向出现较多弧线状衍射信号。

B2.3.2 局部耦合不良也将出现类似特征，但不会在缺陷边缘或深度方向产生弧线状的衍射

波信号。

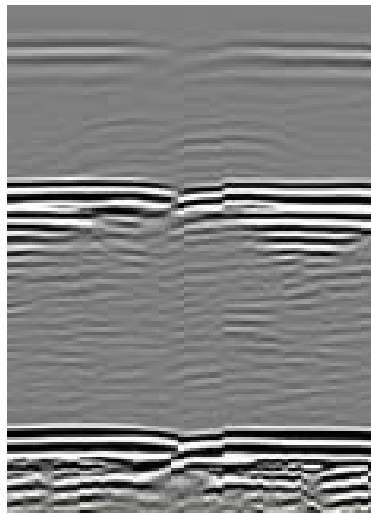


图 B2.3 (a) 贯穿型缺陷

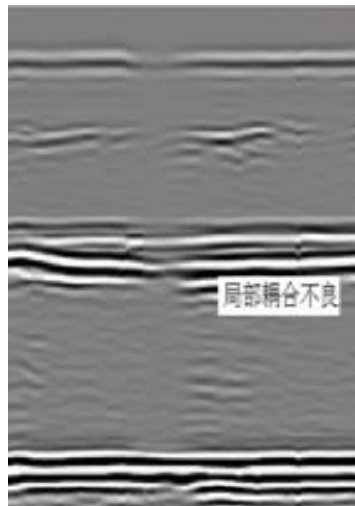


图 B2.3 (b) 局部耦合不良

B2.4 埋藏型缺陷

埋藏型缺陷一般不影响直通波及底波，按照显示特征，可分为点状缺陷，线状缺陷及条状缺陷。

B2.4.1 点状缺陷显示为双曲线弧线状，没有可测量的长度及高度。

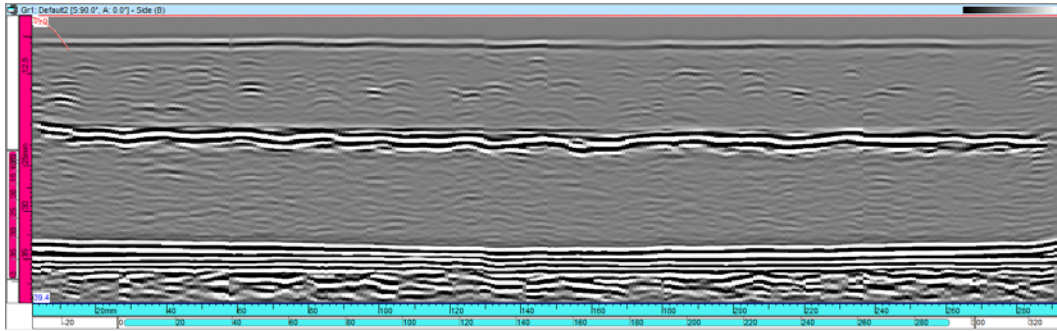


图 B2. 4. 1 点状缺陷

B2.4.2 线状缺陷会显示一定的长度，但没有可测量的高度。

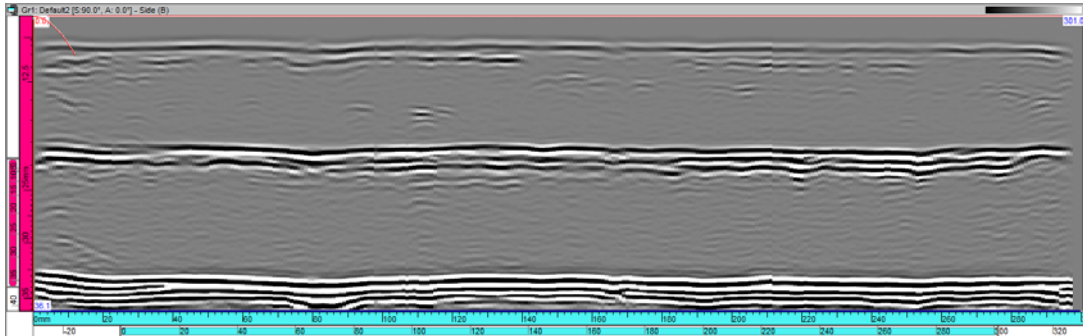


图 B2. 4. 2 线状缺陷

B2.4.3 条状缺陷会显示一定的长度，且具有相位相反的上下尖端信号，可通过上下尖端信号相位特征及位置测量自身高度。

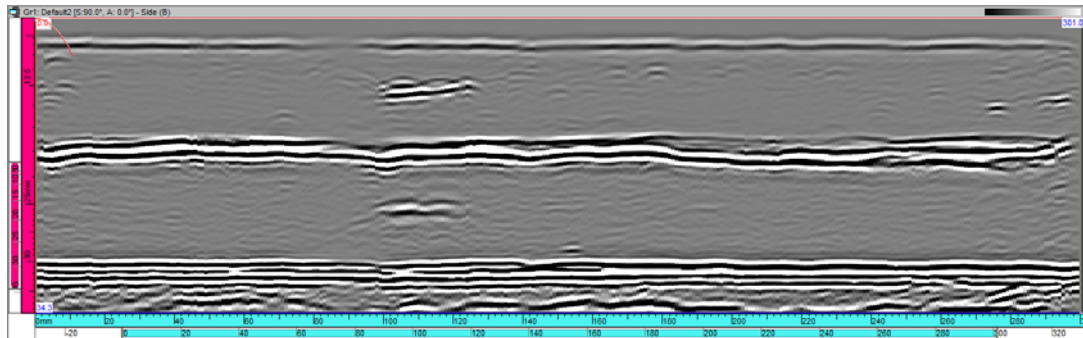


图 B2. 4. 3 条状缺陷

B3 缺陷的测量

B3.1 缺陷测长

B3.1.1 缺陷测长应使用双曲线指针拟合的方法进行。

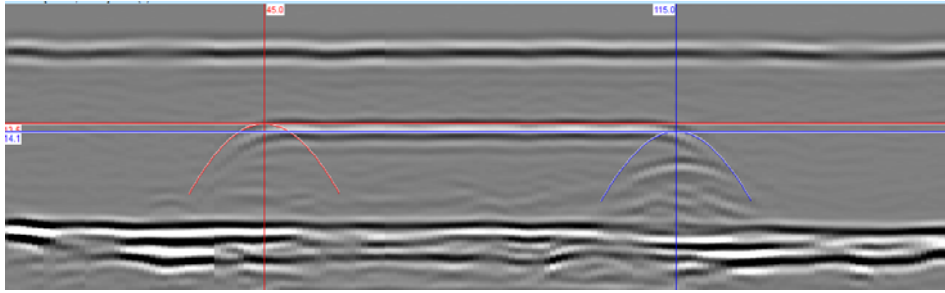


图 B3. 1. 1 使用双曲线指针拟合法进行缺陷测长

B3.1.2 对于弧状显示过长的缺陷，其长度测量时应从弧形末端 $1/3$ 处（持续时间）进行双曲线拟合测长。

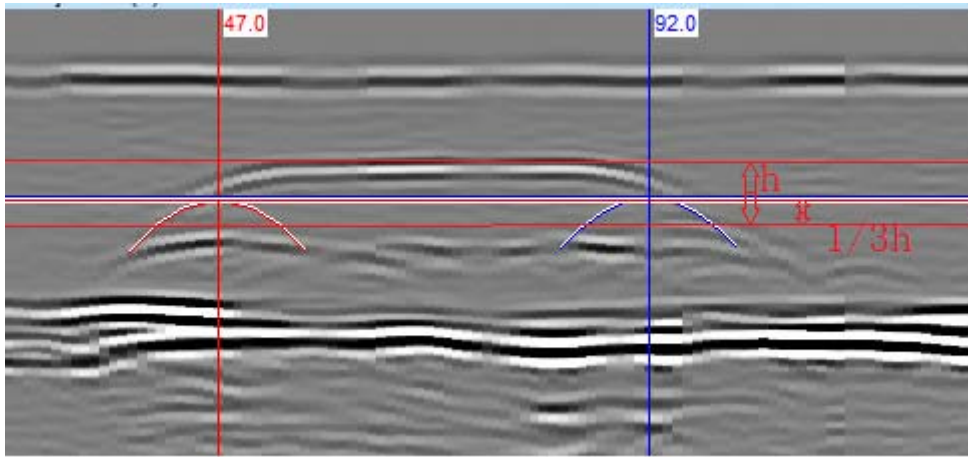


图 B3. 1. 2 弧状显示较长的缺陷测长

B3.2 缺陷测深及测高

B3.2.1 测量缺陷深度及自身高度时，确定信号时间有三种方式：信号起跳点、首个峰值点和最大峰值点。

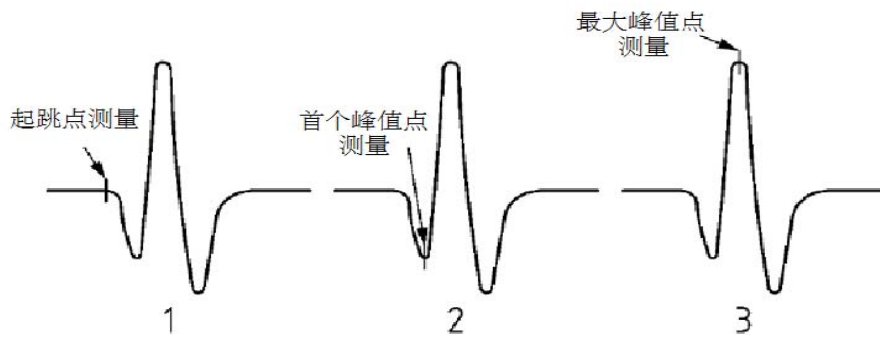


图 B3. 2. 1 测量信号时间的方法

B3.2.2 一般情况下，缺陷上尖端衍射信号的相位与直通波相反，与底波相同；而下尖端的衍射信号相位与直通波相同，与底波相反。缺陷测深及测高时应参照对应信号的相位。

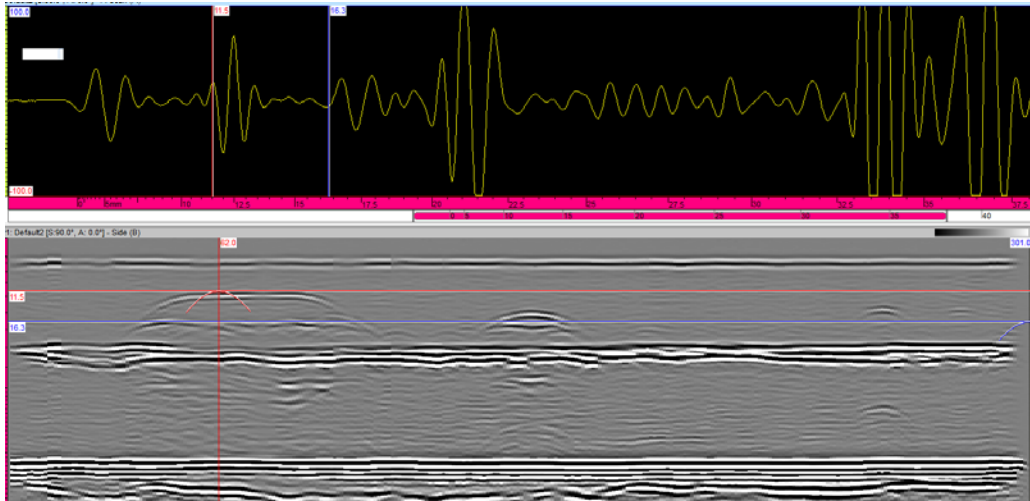


图 B3. 2. 2 缺陷测深及测高方法

附录 C 船舶重要区域

重要区域包括：

1) 150 米及以上船舶，在船舫 0.4L 区域内的强力甲板、舷顶列板、舳列板、船底板、龙骨板、内壳顶列板和纵舱壁顶列板以及支撑这些板的主要构件的焊缝，可计入船体梁剖面模数的连续凸形甲板和连续纵向舱口围板以及支撑这些板的主要构件的焊缝；

2) 外板和强力甲板上紧邻强力贯穿件位置的焊缝，例如挂舵臂、舵踵、桅柱等强力贯穿件，包括将其连接于主要构件的焊缝；

3) 主要承受动态载荷的构件的焊缝，例如尾轴支架、舵踵、舵杆连接法兰（与舵叶本体之间）、以及主机座桁材上的焊缝；

4) 对于拟在低温区域航行船舶（例如破冰船和极地科考船）的主船体全焊透焊缝；

5) 船舶 I 级管系的焊缝。

6) 对于 LNG 和 LPG 船舶的整体液货舱或独立液货舱的全焊透焊缝（不包括薄膜舱），当采用表中所列 CB 或 JIS 标准时，其验收等级均应为 I 级；当采用表中所列 ISO 标准时，验收等级应按重要区域要求。