

指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD02-2017



衍射时差法(TOFD)和相控阵超声检测  
(PAUT)技术应用指南  
2017

生效日期：2017年2月22日

北京

## 出版说明

衍射时差法 (Time-of-Flight Diffraction, 简称 TOFD) 和相控阵超声检测 (Phased Array Ultrasonic Testing, 简称 PAUT) 技术具有缺陷检出率高、定量准确、工艺设计和实现方式灵活、现场数据采集实施快捷、完整保存原始数据并使用多种视图进行成像显示、检测结果受人为因素影响小等诸多特点, 是没有电离辐射和化学污染的绿色环保技术。

本指南主要根据国内外的相关研究成果以及中国船级社近年来在 TOFD 和 PAUT 技术方面的科研成果和实际应用经验, 结合实际应用环境, 经过分析和总结后提出。旨在推动两项技术在船舶和海洋工程领域的广泛应用, 在方法原理、应用范围、设备选用、工艺制定、现场实施、数据判读和质量评级等方面提供技术参考。

TOFD 和 PAUT 技术与超声 A 型脉冲反射法、射线检测、磁粉检测等技术虽然在方法原理、适用范围、技术实施等方面存在差异, 但都有其适用性和局限性, 对缺陷的检出率都不会是 100%, 也不会完全相同。因此, TOFD 和 PAUT 技术与已有的无损检测技术并列存在, 可根据实际情况适当选择, 不存在非此即彼的排斥关系。

# 目 录

出版说明.....	1
第 1 章 通则.....	5
1.1 目的.....	5
1.2 适用范围.....	5
1.3. 机构和人员要求.....	6
1.3.1 机构要求.....	6
1.3.2 人员资质.....	6
1.4 船舶附加标志.....	6
1.5 术语和定义.....	6
第 2 章 TOFD 技术.....	9
2.1 检测设备.....	9
2.1.1 超声仪器.....	10
2.1.1.1 脉冲发生器应符合如下要求: .....	10
2.1.1.2 信号接收器应符合如下要求: .....	10
2.1.1.3 数字化应符合如下要求: .....	10
2.1.2 软件.....	11
2.1.3 探头.....	11
2.1.4 楔块.....	11
2.1.5 试块.....	11
2.1.6. 扫查装置与编码器.....	12
2.2 检测工艺设计.....	12
2.2.1 检测规程.....	12
2.2.2 检测级别.....	13
2.2.3 检测覆盖区域.....	13
2.2.4 检测工艺参数.....	13
2.2.5 扫查类型.....	15
2.2.6 设备参数设置.....	15
2.3 校准.....	17
2.3.1 楔块延迟及声速的测试.....	17
2.3.2 深度坐标线性化.....	17
2.3.3 编码器校准.....	19
2.4 现场数据采集.....	19
2.4.1 表面状态.....	19
2.4.2 检测位置标记及检测方向.....	19
2.4.3 母材检测.....	20
2.4.4 耦合剂.....	20
2.4.5 温度.....	20
2.4.6 扫查和数据采集.....	20
2.5 文件存储.....	22
2.5.1 设置文件.....	22
2.5.2 数据文件.....	22
2.5.3 文件命名格式.....	22

2.5.4 存储形式和要求.....	23
2.6 数据判读.....	23
2.6.1 数据有效性检查.....	23
2.6.2 缺陷分类.....	23
2.7 缺陷评定和验收标准.....	24
2.7.1 危害性缺陷.....	24
2.7.2 单个缺陷.....	24
2.7.3 相邻缺陷.....	25
2.7.4 累计缺陷.....	25
2.7.5 长度的折算.....	26
2.8 报告和归档.....	26
第3章 PAUT 技术.....	27
3.1 检测设备.....	27
3.1.1 超声仪器.....	27
3.1.2 探头.....	28
3.1.3 楔块.....	28
3.1.4 试块.....	29
3.1.5 扫查装置及编码器.....	29
3.2 检测工艺设计.....	29
3.2.1 检测规程.....	29
3.2.2 检测级别.....	29
3.2.3 检测区域.....	31
3.2.4 探头.....	31
3.2.5 楔块.....	31
3.2.6 聚焦法则设计.....	32
3.3 参数设置.....	32
3.3.1 聚焦法则.....	32
3.3.2 脉冲发生器和信号接收器.....	33
3.3.3 显示范围视图选择.....	33
3.3.4 灵敏度设置.....	33
3.3.5 数字化.....	34
3.3.6 扫查设置.....	34
3.4 校准.....	34
3.4.1 晶片检查.....	34
3.4.2 声速及楔块延迟校准.....	35
3.4.3 编码器校准.....	35
3.4.4 灵敏度及 TCG 校准.....	35
3.4.5 系统显示检查.....	35
3.5 现场数据采集.....	36
3.5.1 表面状态.....	36
3.5.2 检测位置标记及检测方向.....	36
3.5.3 母材检测.....	36
3.5.4 耦合剂.....	36
3.5.5 温度.....	36

3.5.6 扫查和数据采集.....	36
3.6 文件存储.....	37
3.7 数据判读.....	37
3.7.1 数据有效性检查.....	37
3.7.2 缺陷分类与记录.....	37
3.8 质量等级和验收标准.....	38
3.9 报告和归档（记录，报告及存档）.....	40
附录 1 TOFD 技术局限性.....	42
附录 2 TOFD 图像的基本特征与缺陷测量方法.....	44
附录 3 试块.....	52
附录 4 设备校准方法.....	56
附录 5 探头激励孔径和聚焦深度对 S-Scan 成像结果的影响.....	60
附录 6 典型缺陷图像.....	63

# 第 1 章 通则

## 1.1 目的

1.1.1 本指南对使用 TOFD 和 PAUT 技术的无损检测活动进行工艺审核、现场监督、检查数据判读结果等提供技术参考，以倡导和推动无损检测新技术的广泛应用。

## 1.2 适用范围

1.2.1 本指南适用于船舶、海洋工程或其他钢结构在建造、维修、营运或服役过程中对材料、构件和焊接接头内部的质量进行无损检测。

1.2.2 本指南适用于中国船级社《材料与焊接规范》中碳素钢或低合金钢，对于其他的细晶、各向同性或低声衰减金属材料，也可参照使用。对于不满足上述要求，通过试验验证并经本社认可后，PAUT 技术亦可用于铝及其合金、奥氏体不锈钢、铁素体-奥氏体双相不锈钢、钛合金等材料及连接焊缝的检测。

1.2.3 TOFD 技术适用于母材厚度 $\geq 10\text{mm}$ 的全熔透焊缝的质量检测，且仅适用于平板对接或者管对接焊缝。

1.2.4 PAUT 技术适用于母材厚度 $\geq 6\text{mm}$ 的全熔透焊缝的质量检测，适用于平板对接、管对接、T 形或者角形连接焊缝。

1.2.5 对于不满足第 1.2.4 条、第 1.2.5 条要求，通过试验验证并经本社认可后，可用于其他母材厚度的全熔透焊缝检测。

1.2.6 适用于外径大于 250mm 或内外径之比大于 0.7 的筒体纵向焊缝、筒体外径大于 200mm 的筒体周向焊缝、各种尺寸的曲面相贯焊缝。对于不满足上述要求的，通过试验验证并经本社认可后，也可采用 TOFD 或 PAUT 技术进行检测。

1.2.7 PAUT 技术适用于中国船级社《材料与焊接规范》中规定的进行超声 A 型脉冲反射法检测的母材或构件,但形成扫描的每条波束应满足采用超声 A 型脉冲反射法相关标准中的技术要求,且相邻波束的间隔不大于标准中要求的探头扫查间距。

## 1.3. 机构和人员要求

### 1.3.1 机构要求

1.3.1.1 应符合 CCS 无损检测机构认证、认可的相关要求。

### 1.3.2 人员资质

1.3.2.1 从事 TOFD 和 PAUT 技术检测的人员应获得 CCS 颁发或认可的无损检测资格证书,方可从事与资格等级对应的检测工作,具体内容参见中国船级社《无损检测人员资格鉴定与认证规范》。

## 1.4 船舶附加标志

1.4.1 在我社验船师监督下,按照本指南要求对相关结构进行过 TOFD 或 PAUT 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 (T) 或 ANDT (P)”船舶附加标志。

## 1.5 术语和定义

1.5.1 本指南采用的术语定义如下:

(1) 衍射时差法超声检测技术 (Time of Flight Diffraction, 简称 TOFD)

通常使用一对或多对具有宽带短脉冲、大波束扩散角的纵波斜探头,采用一发一收的工作方式,是根据待检试件内部缺陷端角衍射信号的到达时间进行缺陷

检测和定量的一种超声检测方法。

(2) 相控阵超声检测技术 ( Phased Array Ultrasonic Testing, 简称 PAUT)

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。

(3) 探头间距 ( Probe Center Separation, 简称 PCS)

指发射探头和接收探头两入射点之间的直线距离。

(4) 平行扫查 ( Parallel Scan)

探头运动方向与声束方向平行的扫查方式, 一般用于已知缺陷的精确定位及定量。

(5) 非平行扫查 ( Non-parallel Scan)

探头运动方向与声束方向垂直的扫查方式, 通常特指探头对称于焊缝放置的扫查方式。

(6) 偏置非平行扫查 ( Offset Non-Parallel Scan)

TOFD 探头对的连线中心与焊缝中心保持一定偏移量的非平行扫查方式。

(7) 线性扫描/电子扫描 (Linear Scan/ Electronic Scan, 简称 E-Scan)

以相同的聚焦法则施加在相控阵探头中的不同晶片组, 每组激活晶片产生某一特定角度的声束, 通过改变起始激活晶片的位置, 使该声束沿晶片阵列方向前后移动, 以实现类似常规手动超声波检测探头前后移动的检测效果。

(8) 扇形扫描 (Sectorial Scan, 简称 S-Scan)

用一定的延时法则, 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进行连续偏转, 其数据显示为



每一个角度的波束 A 扫描图像通过延迟和角度校正形成的 2D 图像。

#### (9) 聚焦法则 (Focal Law)

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，实现波束角度偏转和聚焦的程序。

## 第 2 章 TOFD 技术

本章给出使用 TOFD 技术进行缺陷检测和评级的方法，规定了检测设备、工艺设计、校准、现场数据采集、数据判读、检测报告等方面的基本要求。附录 1 中详细介绍了 TOFD 技术在应用中的局限。

### 2.1 检测设备

TOFD 检测设备包括超声设备主机(仪器)、软件、探头/楔块、扫查装置、试块及其他附件，如图 1 所示。上述设备应具有产品质量合格证或制造厂家出具的合格文件，且超声仪器应在有效的校准期内。

TOFD 检测设备除满足本章的要求外，还应满足 JB/T10061 和 CB/T3559 中的相关要求。

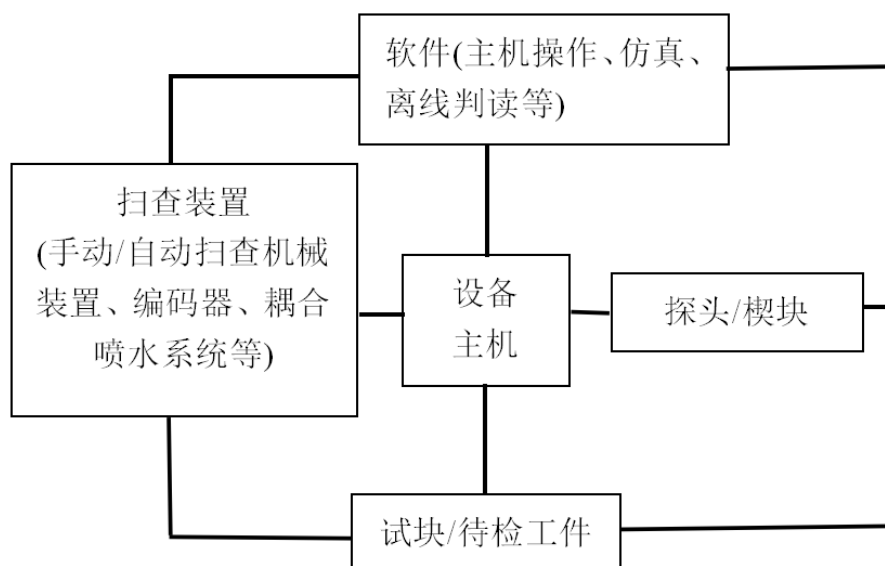


图 2.1 检测设备构成

## 2.1.1 超声仪器

### 2.1.1.1 脉冲发生器应符合如下要求：

- (1) 发射脉冲可以是单级或双级的尖脉冲或方波脉冲，上升时延不超过 **0.25** 倍的探头标称频率对应的周期。
- (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) 发射脉冲应具有足够的电压，确保检测系统具有足够的灵敏度及信噪比。

### 2.1.1.2 信号接收器应符合如下要求：

- (1) 接收器的带宽应不小于探头标称的带宽范围，通常不小于 0.8MHz-15MHz。
- (2) 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。
- (3) 因 TOFD 检测时衍射信号能量较弱，当信噪比不足时应增加信号前置放大器。

### 2.1.1.3 数字化应符合如下要求：

- (1) 射频信号的数字化采样频率至少应为探头标称频率的 4 倍，当数字信号需进行后处理时，数字化采样频率至少应为探头标称频率的 8 倍。
- (2) 采样位数应不小于 8 位。
- (3) 至少应具有 256 级灰度编码显示。
- (4) A 扫信号的起始延迟应在 0~200 $\mu$ s 范围内可调，窗口范围在 5~100 $\mu$ s 内可调。
- (5) 仪器应具有信号平均功能，最大平均次数不少于 8 次。
- (6) 仪器应具有基于位置编码的数据采集功能。

## 2.1.2 软件

2.1.2.1 应具有深度坐标的线性化计算或深度校准功能。

2.1.2.2 应具有将采集到的所有原始数据以不可更改的方式进行拷贝的功能。

2.1.2.3 应具有对数据进行软件处理（如直通波同步、直通波去除，SAFT 等），且不更改原始检测数据的功能。

## 2.1.3 探头

2.1.3.1 一般使用宽波束纵波斜探头进行检测。

2.1.3.2 TOFD 检测时一般应使用专用的 TOFD 探头进行检测。但若满足使用要求，也可使用相控阵探头、电磁超声探头（EMAT）或其他非标探头进行检测。

2.1.3.3 探头标称中心频率与实测值误差值应小于 10%。

2.1.3.4 探头的-6dB 频带相对宽度应不小于 80%。

2.1.3.5 直通波的-20dB 脉冲宽度应不大于 2 个周期。

## 2.1.4 楔块

2.1.4.1 采用接触法进行 TOFD 检测时，两侧楔块一般应具有相同的折射角度。但若验证合格，特殊结构也可使用不同折射角度的楔块。

2.1.4.2 应在楔块上标记出理论波束出射点的位置。

2.1.4.3 探头安装在楔块上，耦合状态应良好、稳定。

2.1.4.4 检测面曲率半径小于 150mm 时，应使用相应曲面楔块保证耦合。且楔块的曲面应保证楔块与工件的最大间隙不大于 0.5mm。

## 2.1.5 试块

2.1.5.1 TOFD 试块一般包括盲区试块、对比试块等。盲区试块用于测量制定工艺的上下表面盲区，对比试块用于确认系统灵敏度或检测能力。

2.1.5.2 试块应采用声学性能与被检工件相同或相似的材料制作，且试块内部超声波束可能通过的区域不应有大于或等于  $\Phi 2\text{mm}$  平底孔当量的缺陷。

2.1.5.3 对比试块厚度应为被检工件厚度的 0.8-1.5 倍，最大厚度差不大于 20mm。试块最大厚度应保证在试块底面中心直接反射的波束角度不小于 40 度，最小厚度应保证两探头理论波束交点位于试块内部。

2.1.5.4 被检工件为曲表面时，若表面曲率半径小于或等于 150mm，则应使用相应的曲表面对比试块，对比试块表面的曲率半径应不超出工件曲率半径的 0.9-1.5 倍。被检工件表面曲率半径大于 150mm 时，则可采用平面试块。

2.1.5.5 对比试块应按附录 3 的要求进行加工。盲区测试试块可参照附录 3 的要求进行加工，或使用同等功能的试块。

## 2.1.6. 扫查装置与编码器

2.1.6.1 扫查装置应保证 TOFD 探头对 PCS 相对稳定。

2.1.6.2 手动或半自动检测时，探头移动与编码器信号应同步。

2.1.6.3 全自动检测时，编码信号一般不允许使用电机控制信号，除非有反馈装置确保编码信号与当前位置探头的 A 扫描信号同步。

## 2.2 检测工艺设计

### 2.2.1 检测规程

2.2.1.1 TOFD 检测工艺规程主要应包括以下内容：

- (1) 确定检测目的(检测任务、检测位置、依据标准、检测级别、验收等级等)；
- (2) 确定产品范围(工件形状、规格、材质、壁厚、焊接工艺等)；
- (3) 工艺设计(主机型号、探头/楔块、扫查装置、试块、PCS、盲区和横向缺陷补充检测等)；
- (4) 参数设置及校准；
- (5) 工艺验证；
- (6) 检测准备；
- (7) 扫查和数据采集；
- (8) 数据分析和判读；

(9) 缺陷评价和质量分级。

## 2.2.2 检测级别

- (1) 检测级别由低到高分为 A, B, C, D 四个级别, 详细要求见表 2.2.2.1。
- (2) A 级检测仅适用于板厚不大于 50mm 的焊缝
- (3) 在役检测仅适用于 D 级检测。
- (4) 若验收准则要求精确测量缺陷尺寸及位置, 则应按照 D 级检测要求制定工艺。

表 2.2.2.1 检测级别

检测级别	TOFD 设置	对比试块验证参数设置	对比试块设置灵敏度	偏置扫查	规程文件
A	如表 2	否	否	否	否
B	如表 2	否	是	否	否
C	如表 2	是	是	a	是
D	特定设置	是	是	a	是

a: 必须明确偏置扫查的作用、次数和偏置距离。

## 2.2.3 检测覆盖区域

2.2.3.1 检测覆盖区域应满足以下要求:

- (1) 检测覆盖区域的高度应为工件厚度。
- (2) 检测覆盖区域的宽度应为焊缝宽度, 再加上焊缝两侧各 10mm 的区域或实际测量的热影响区 (取较大者)。
- (3) 对已发现缺陷应进行复检或精确定量, 检测区域可根据需要适当缩小。
- (4) 检测区域应在检测报告中注明。

## 2.2.4 检测工艺参数

2.2.4.1 检测工艺参数应满足以下要求:

- (1) 母材厚度不大于 50mm 的焊缝，可使用一组 TOFD 设置对其进行检测；母材厚度大于 50mm 时，因一组设置覆盖能力不足，应在焊缝厚度方向进行分区检测，推荐的分区个数及检测方法见表 2.2.4.1。
- (2) 成对使用的 TOFD 探头的标称频率及晶片尺寸应相同，具体参数应根据被检工件厚度或分区深度及厚度综合选择，推荐的参数见表 2.2.4.1。
- (3) 楔块角度与 PCS 是关联参数，选择的楔块角度及 PCS 值应覆盖检测区域的声场。一般情况下，所选择楔块角度能使缺陷尖端位置的发射和接收声束之间的夹角在 120 度左右。当该角度减小到 90 度以下或增加到 165 度以上时，衍射信号微弱，应避免使用。
- (4) 因斜探头的上扩散角大于下扩散角，发射和接收波束的交点应设置在检测区域中心偏下位置，通常设置在检测区域深度 2/3 处，以此计算楔块角度和 PCS 值。
- (5) 精确测量已知缺陷时，楔块角度推荐使用 55-60 度，并使发射和接收波束的交点落在缺陷深度处。

表 2.2.4.1 10mm~400mm 平板对接焊缝分区设置

板厚 t(mm)	分区数	检测深度 (mm)	探头频率 (MHz)	声束角度 $\alpha(^{\circ})$	探头晶片尺寸 (mm)
$\geq 10\sim 15$	1	0~t	15~7	70~60	2~4
$> 15\sim 35$	1	0~t	10~5	70~60	2~6
$> 35\sim 50$	1	0~t	5~3	70~60	3~6
$> 50\sim 100$	2	0~2t/5	7.5~5	70~60	3~6
		2t/5~t	5~3	60~45	6~12
$> 100\sim 200$	3	0~t/5	7.5~5	70~60	3~6
		t/5~3t/5	5~3	60~45	6~12
		3t/5~t	5~2	60~45	6~20
$> 200\sim 300$	4	0~40	7.5~5	70~60	3~6
		40~2t/5	5~3	60~45	6~12
		2t/5~3t/4	5~2	60~45	6~20
		3t/4~t	3~1	50~40	10~20
$> 300\sim 400$	5	0~40	7.5~5	70~60	3~6
		40~3t/10	5~3	60~45	6~12
		3t/10~t/2	5~2	60~45	6~20
		t/2~3t/4	3~1	50~40	10~20
		3t/4~t	3~1	50~40	12~25

## 2.2.5 扫查类型

2.2.5.1 扫查类型应满足以下要求：

- (1) 一般使用非平行扫查进行检测。
- (2) 偏置非平行扫查可以减小底面检测盲区，C 级以上检测时，须使用非平行扫查及偏置非平行扫查进行检测。
- (3) 对缺陷进行精确测深及精确测高时，须在缺陷位置进行平行扫查。

## 2.2.6 设备参数设置

2.2.6.1 PCS 设置应按照表 2.2.4.1 计算得出的理论值，调整探头的 PCS，并在仪器中设置。

2.2.6.2 脉冲发生器和信号接收器参数应满足下列要求：

- (1) 激励电压设置：为获得良好的信噪比，激励电压一般选择高电压；在灵敏度及信噪比足够的情况下，也允许使用低电压，以保护探头。
- (2) 脉冲宽度：应根据探头频率、直通波宽度、检测灵敏度和信噪比的综合需要调节脉冲宽度。
- (3) 脉冲重复频率：脉冲重复频率应尽量高，以适应较快的检测速度；但应避免脉冲重复频率过高时带来的幻影回波。
- (4) 滤波设置：可选用带通、高通或低通滤波，改善信噪比。
- (5) 检波方式：采用非检波的射频（RF）信号。

2.2.6.3 数字化参数应满足下列要求：

- (1) 采样频率：至少为探头标称频率的 4 倍，当数据需后处理时，至少为探头标称频率的 8 倍。
- (2) 采样位数：至少为 8 位。
- (3) 信号平均：为了降低随机噪声，提高信噪比，TOFD 检测允许采用信号平均。

2.2.6.4 显示范围应符合下列要求：

- (1) 使用单通道方法检测时，A 扫描信号应最少显示到直通波前 0.5us，底面



反射波后 0.5us。因波型转换区域内的横波信号可显示表面或底面盲区内的缺陷信号，所以显示范围终止位置应设置为工件底面一次波形转换信号后 0.5us。

- (2) 分区检测时，第一个分区的 A 扫描信号应显示到直通波前 0.5us；最后一个分区显示终止应设置到底面反射回波后 0.5us；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。

#### 2.2.6.5 视图选择应符合下列要求：

TOFD 显示应至少包含 A 扫描信号及灰度显示的 B 扫描图像。

#### 2.2.6.6 灵敏度设置应符合下列要求：

- (1) 为保证缺陷的信号在数字转换器范围内，应限制噪声信号，使超声检测信号大于电噪声信号。
- (2) 设备设置（包括电噪声抑制和系统增益）应调节至直通波到达之前的电噪声，其比在直通波到达之后的时基线区域内的电噪声，在幅值上至少低 6dB，后者宜设置在幅度范围的 5%左右。
- (3) 灵敏度的设置可用附录 3 参考试块中的代表性缺陷以及人工缺陷调节，以获得合理的增益设置和信噪比。
- (4) A 级检测时，可直接在工件上设置检测灵敏度。设置时，将无缺陷位置的直通波波幅调整至满屏高的 40%-80%，作为检测灵敏度；若直通波不可见，则应将底波调整至满屏高的 80%，再增加 20-32dB；若二者均不可见，可将材料晶粒噪声调整至满屏高的 5%-10%。
- (5) 检测级别为 B 级或 B 级以上时，须使用对比试块调整检测灵敏度。试块上设置灵敏度时，须将试块上较弱的衍射波信号调整至满屏高的 40%-80%。实际检测时应增加耦合补偿。耦合补偿量参照超声 A 型脉冲反射法的耦合补偿测量方法进行补偿。
- (6) 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%。

#### 2.2.6.7 扫查设置应符合下列要求：

- (1) 数据记录长度应设置为实际扫查长度加 20-30mm，进行环焊缝或长焊缝连续扫查时，实际扫查长度应为焊缝长度加 20mm。
- (2) 根据工件板厚范围，设置相应的扫查步进量或扫查分辨率，具体数值参

照表 2.2.6.7。

表 2.2.6.7 扫查分辨率

板厚 $t/\text{mm}$	最大扫查步进/ $\text{mm}$
$10 \leq t < 150$	1.0
$t \geq 150$	2.0

2.2.6.8 参数设置检查应符合下列要求：

- (1) 采用 B 级及以上检测级别时，检测之前应在试块上确认仪器灵敏度和上表面盲区。
- (2) 确认灵敏度时，使用对比试块，缺陷的信号幅度应在满屏高度的 40%-80% 范围内。
- (3) 确认上表面盲区时，使用盲区试块找出能辨别的最浅横孔信号，以该横孔的埋藏深度作为上表面盲区，并在报告中予以记录。

## 2.3 校准

### 2.3.1 楔块延迟及声速的测试

2.3.1.1 楔块延迟测试时，可将安装好探头的两楔块底面接触，移动楔块相对位置获得最大回波，通过测试回波时间获得楔块延迟时间。

2.3.1.2 声速测试应在与工件相同材质的试块上进行，必要时可在工件上进行验证。

### 2.3.2 深度坐标线性化

2.3.2.1 为保证将显示的时间坐标转化为深度坐标，对 TOFD 系统而言，坐标线性化应包括下列 6 个变量：

- (1) 楔块延迟时间  $t_0$ ；
- (2) 直通波到达时间  $t_L$ ， $t_L=2t_0+2t_1$ ；
- (3) 反射体回波到达时间  $t_R$ ， $t_R=2t_0+2t_2$ ；
- (4) 声波在工件中的传播速度  $V_L$ ；
- (5) 反射体深度  $H$ （一般情况下，反射体取试块底面，此时  $H$  即为工件板厚

T)

(6) 波束出射点之间的距离 S

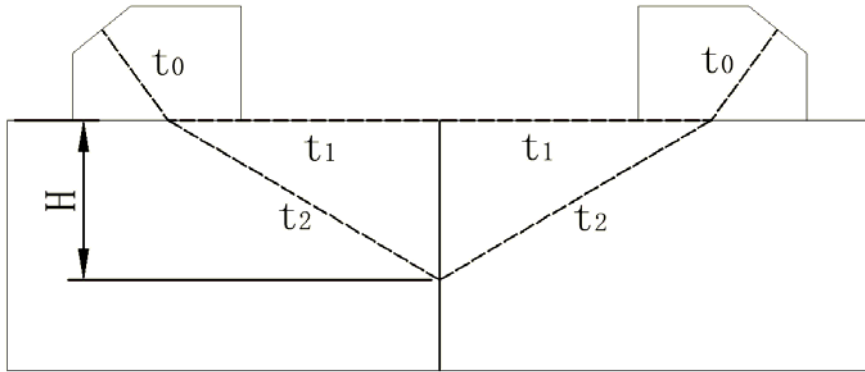


图 2.3.2.1 TOFD 检测深度坐标线性化示意图

各参数间的关系可用下述方程式表征：

$$(t_L - 2t_0)V_L = S \quad (1)$$

$$(t_L - 2t_0)^2 V_L^2 + H^2 = (t_R - 2t_0)^2 V_L^2 \quad (2)$$

$t_L$  及  $t_R$  均可在仪器中精确测量，故坐标线性化工作的目的在于确定其他 4 个变量，这样系统便可根据方程(3)计算出任意时间  $t_x$  处的真实深度  $h$  值。

$$(t_L - 2t_0)^2 V_L^2 + h^2 = (t_x - 2t_0)^2 V_L^2 \quad (3)$$

综上所述，系统存在 2 个独立方程，4 个变量。所以测量 4 个变量中的任意 2 个，并通过方程校准其余变量，整个校准方式共有 6 种，具体如表 2.3.2.1 所示。实际使用中，应根据各测量值可能产生的测量误差综合考虑，选择合适的校准方法。

表 2.3.2.1 TOFD 检测中各种深度坐标线性化方法

方法	测量值	校准值
1	楔块延迟 $t_0$ ，PCS 值 S	目标反射体深度 H，声速 $V_L$
2	楔块延迟 $t_0$ ，声速 $V_L$	目标反射体深度 H，PCS 值 S
3	楔块延迟 $t_0$ ，目标反射体深度 H	声速 $V_L$ ，PCS 值 S
4	PCS 值 S，声速 $V_L$	目标反射体深度 H，楔块延迟 $t_0$
5	PCS 值 S，目标反射体深度 H	声速 $V_L$ ，楔块延迟 $t_0$
6	声速 $V_L$ ，目标反射体深度 H	楔块延迟 $t_0$ ，PCS 值 S

- (7) 深度线性化校准后，在试块上的深度测量误差应不大于 0.2mm。
- (8) 曲面工件或其他非平面工件的纵向焊接接头，深度校准结果应作适当补偿。

### 2.3.3 编码器校准

2.3.3.1 编码器校准应满足下列要求：

- (1) 编码器应在每次使用前进行校准。
- (2) 编码器校准时移动长度应不小于 500mm，经校准的编码器测量误差应不大于 1%。

## 2.4 现场数据采集

### 2.4.1 表面状态

2.4.1.1 数据采集时表面状态应满足下列要求：

- (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。经打磨的表面，其表面粗糙度 Ra 应不大于  $12.5\ \mu\text{m}$ ；经机加工的表面，表面粗糙度 Ra 应不大于  $6.3\ \mu\text{m}$ 。
- (2) 进行偏置非平行扫查或平行扫查时，一般应将相应检测区域焊缝余高去除，与两侧母材平齐。
- (3) 若检测面存在较大的凹坑，则应进行补焊；且补焊区域应修磨至与临近母材平齐。

### 2.4.2 检测位置标记及检测方向

2.4.2.1 检测位置标记及检测方向应满足下列要求：

- (1) 检测位置应根据焊缝、结构等信息给出永久性参考位置，以保证数据的可追溯及重复性。
- (2) 焊缝的扫查方向应制订专门的规则，如甲板焊缝从左舷向右舷，舷侧焊缝从上向下，纵缝从船尾向船头等。
- (3) 非平行扫查时，应根据焊缝中心线绘制扫描位置参考线，标明扫查方向，保证探头沿预期的工艺进行扫查。
- (4) 平行扫查时，应绘制扫描参考线并标明扫查方向。

## 2.4.3 母材检测

2.4.3.1 母材检测应满足下列要求：

- (1) 采用垂直波束对母材进行检测，保证对信号进行正确判断。
- (2) 检测重要工件时，应对超声波束通过的母材区域进行垂直波束检测。对影响检测结果的反射指示应予记录。
- (3) 采用垂直波束检测母材时，至少应显示两次工件底波，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。缺陷信号幅度超过 20%或底波消失的区域，应做好标记，并予以记录。

## 2.4.4 耦合剂

2.4.4.1 耦合剂的使用应满足下列要求：

- (1) 耦合剂应在一定温度范围内保证稳定可靠的声学性质。
- (2) 耦合剂应对操作人员、受检工件及环境无害。
- (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。

## 2.4.5 温度

数据采集时使用温度的要求：

- (1) 使用普通探头及耦合剂时，工件表面温度应在 0°C~50°C范围内。
- (2) 检测校准与实际检测温度变化应在 20°C以内。
- (3) 若工件表面温度超出范围，应使用特定的耦合剂和探头，且设置和校准应在实际检测温度下实施。

## 2.4.6 扫查和数据采集

2.4.6.1 扫查速度应满足下列要求：

最大扫查速度与脉冲重复频率、接收信号平均次数、扫查分辨率有关，实际扫查速度不能大于最大扫查速度，且应保证采集的数据质量达到条款 2.6 的要求。

最大扫查速度  $V_{\max}$  按下式计算：

$$V_{\max} = \frac{PRF}{N} \Delta x$$

其中：

$V_{\max}$ ：最大扫查速度，mm/s

PRF：设备脉冲重复频率，Hz

N：接收信号平均次数

$\Delta X$ ：扫查步进，mm

#### 2.4.6.2 扫查覆盖应满足下列要求：

长度方向分段扫查的焊缝，各段扫查区域应至少有 20mm 的重叠；对环焊缝，则扫查停止位置应越过起始位置至少 20mm。

#### 2.4.6.3 扫查偏移应满足下列要求：

非平行扫查及偏置非平行扫查时，实际扫查路径与设计路径的偏差距离应不大于探头间距(PCS)值的 10%。

#### 2.4.6.4 重新扫查应符合下列要求：

- (1) 数据质量不合格，按条款 2.6.1 的要求进行扫查。
- (2) B 扫描显示的扫查长度与实际长度的误差超过扫查长度的 1%或 5mm(取较小值)。
- (3) 扫查偏移量超过 2.4.6.3 的要求，应重新进行扫查。

#### 2.4.6.5 系统校验应满足下列要求：

- (1) 至少每 4 小时对系统进行一次校验。
- (2) 每次检测完毕或系统硬件改变后均应进行系统校验。
- (3) 若系统调整时未使用试块，则检测系统校验应在工件初始设置位置进行；若系统调整时使用了试块，则系统校验时应使用相同的试块。
- (4) 检测系统出现如表 2.4.6.5 中偏差时，应重新调整系统，并对最近一次系统校验合格后完成的扫查区域重新进行检测。

表 2.4.6.5 系统校验要求

灵敏度	
灵敏度偏离不大于 6dB	数据判读使用软增益调整
灵敏度偏离大于 6dB	调整设置，重新扫查。

显示范围	
范围偏离不大于 0.5mm 或 2%深度范围（取大者）	
范围偏离大于 0.5mm 或 2%深度范围（取大者）	调整设置，重新扫查。

2.4.6.6 补充检测应符合下列要求：

- (1) 针对 TOFD 检测的上表面盲区,可采用 MT、超声 A 型脉冲反射法或 PAUT 等方法进行补充检测。
- (2) 检测焊缝的横向缺陷可采用 TOFD 斜向 45 度非平行扫查、超声 A 型脉冲反射法小角度斜探头并视焊缝余高表面状态，优先在焊缝上进行平行扫查。

## 2.5 文件存储

### 2.5.1 设置文件

2.5.1.1 文件存储时应保存单独的原始设置文件。

### 2.5.2 数据文件

2.5.2.1 数据文件保存时，应保存非检波的 A 扫描信号，不允许单独保存图片格式的检测图像。

### 2.5.3 文件命名格式

2.5.3.1 文件名字应至少包含工程号、检测部位、扫查分段号、板厚、操作人员等信息。

## 2.5.4 存储形式和要求

2.5.4.1 设置文件和数据文件须需以不可更改的方式存储，文件名应唯一，检测数据长期保存以备查。

## 2.6 数据判读

### 2.6.1 数据有效性检查

2.6.1.1 数据判读前，应检查数据质量，保证数据有效性。

2.6.1.2 若数据丢失，其丢失量不超过检测长度的 5%，但不允许相邻扫查点的数据丢失。

2.6.1.3 耦合状态：在扫查范围内，不允许直通波、底面波、晶粒噪声或波型转换信号较其基准降低 12dB 及以上；若存在焊缝、结构等，应在检测记录中予以注明。

- (1) 数据长度：检测数据长度应与实际检测长度一致，误差不大于实际长度的 1%或 5mm(取小值)，分段扫查时相邻数据应至少有 20mm 长度重叠。
- (2) 扫查分辨率：与设置值一致。
- (3) 显示范围：检测长度内不允许直通波或底面波显示不全。
- (4) A 扫信号的噪声不应大于 20%满屏高。

### 2.6.2 缺陷分类

2.6.2.1 按缺陷性质，缺陷分为危害性缺陷和非危害性缺陷。危害性缺陷主要包括裂纹、未熔合、未焊透等；非危害性缺陷主要包括气孔、夹渣/杂等。

2.6.2.2 记录缺陷应包括以下信息：

- (1) 缺陷类型(缺陷性质，表面开口/底面开口/贯穿型/埋藏型，点状/线状/面状等)
- (2) 缺陷的位置、长度、深度及自身高度(如可测)。
- (3) 缺陷的分布特征(单点、散布、密集等)。



## 2.7 缺陷评定和验收标准

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。其中, 1 级质量至少采用 B 级检测, 2 级质量要求至少采用 A 级检测。

缺陷评定按照是否有危害性、单个缺陷、相邻缺陷、累计缺陷的次序进行评定。

附录 2 中对 TOFD 图像特征与缺陷测量方法进行了详细描述, 附录 6 为典型缺陷图像。

### 2.7.1 危害性缺陷

2.7.1.1 裂纹、未熔合、未焊透等危害性缺陷均评为 3 级。

2.7.1.2 横向缺陷评为 3 级。

### 2.7.2 单个缺陷

2.7.2.1 非危害性单个缺陷根据缺陷的位置、自身高度和长度按照表 2.7.2.1 进行评定。

表 2.7.2.1 单个缺陷的评定

验收标准	母材厚度范围(mm)	当 $h < h_2$ 或 $h_3$ 时的最大允许长度 $L_{max}$ (mm)	当 $L \leq L_{max}$ 时最大允许高度		当 $L \geq L_{max}$ 时最大允许高度 $h_1$ (mm)
			表面开口缺陷 $h_3$ (mm)	埋藏型缺陷 $h_2$ (mm)	
I 级	$10 < t \leq 15$	$0.75t$	1.5	2	1
	$15 < t \leq 50$	$0.75t$	2	3	1
	$50 < t \leq 100$	40	2.5	4	2
	$t > 100$	50	3	5	2
2 级	$10 < t \leq 15$	$t$	2	2	1
	$15 < t \leq 50$	$t$	2	4	1
	$50 < t \leq 100$	50	3	5	2
	$t > 100$	60	4	6	3
3 级	超过 2 级者				

\* 当采用本指南以外的验收标准时, 需经 CCS 认可

## 2.7.3 相邻缺陷

2.7.3.1 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 $l_g$ 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（ $h_g$ ）；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 2.7.3.1 所示。

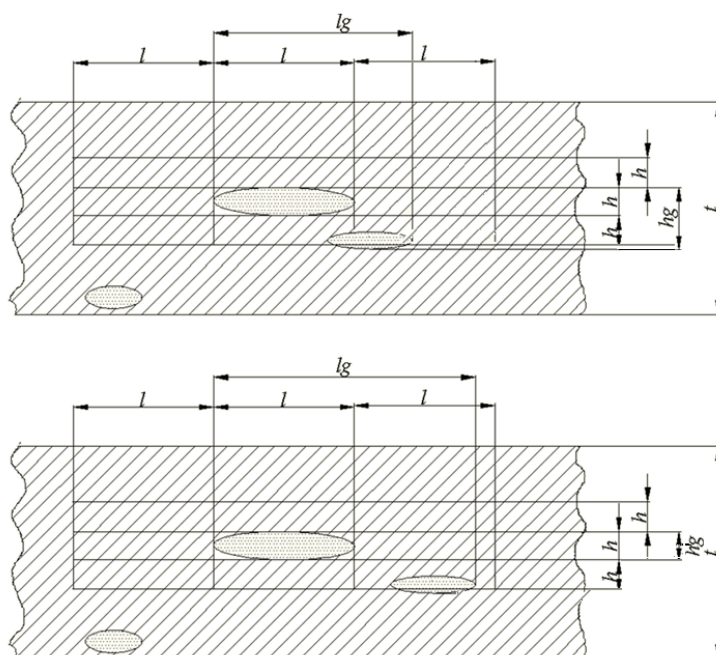


图 2.7.3.1 TOFD 检测时的临近缺陷

## 2.7.4 累计缺陷

2.7.4.1 按照不同的验收等级要求，任意  $12t$  范围内，多个缺陷的累计长度应不超过以下值：

- 1 级： $3.5t$ ，最大 150mm
- 2 级： $4t$ ，最大 200mm
- 3 级：超过以上限值者

2.4.4.2 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  $1.2t$  的个数，其中  $t$  的单位为毫米。例如，对母材厚度为 20mm 的焊缝，在任意 150mm 长度内，点状缺陷的数量应不大于 24 个。

## 2.7.5 长度的折算

2.7.5.1 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。

## 2.8 报告和归档

2.8.1 归档的文件应包含设置文件(仪器自动生成)，检测报告和原始数据，所有文件均应长期保存备查。

2.8.1.1 检测报告应包含以下内容：

(1) 被检工件

其中被检工件又涵盖工程名称、被检工件的名称（规格、材料和状态）和焊缝坡口形式内容。

(2) 硬件名称

其中硬件名称包括主机名称及识别号、主机校准有效期、头名称及识别号、楔块名称、编码器识别号和试块名称及识别号内容。

(3) 参数设置内容

其中参数设置内容包括参考标准、检测级别、探头频率、探头晶片尺寸、楔块角度、PCS 值、编码器分辨率、平均次数、探头相对于焊缝的位置、试块验证数据、上表面盲区尺寸项目的数据值。

(4) 检测内容

其中检测内容包括设置文件名称、检测类型、检测时机、表面状况、耦合剂、检测温度、扫查步进、检测位置及编号方式、检测方向等内容。

(5) 缺陷评定

其中缺陷评定包括数据判读软件名称及版本、参考标准、验收级别、所使用的数据处理功能、缺陷类型或特征、缺陷在焊缝长度方向上的位置、缺陷长度、缺陷深度或自身高度、是否符合验收要求、超标缺陷示意图和扫描图像等内容。

(6) 相关人员信息

数据采集人员姓名、级别、签字及日期；数据分析人员姓名、级别、签字及日期；报告审核人员姓名、级别、签字及日期。

## 第3章 PAUT 技术

本节给出使用 PAUT 技术进行缺陷检测和评级的方法，规定了检测设备、工艺设计、校准、现场数据采集、数据判读、检测报告等方面的基本要求。

PAUT 分为手工及半自动/自动两种方式。手工方式不进行编码数据采集，多采用锯齿形扫查，与 A 型脉冲反射式超声波相似。半自动/自动方式进行编码数据采集，但不能进行环绕、转角、前后等辅助扫查，不能检出横向缺陷。半自动/自动方式的区别在于前者是手工推动扫查，后者采用电机驱动自动扫查。

本指南主要讨论采用半自动/自动方式的 PAUT 技术。

### 3.1 检测设备

PAUT 检测设备包括超声设备主机(仪器)、软件、探头/楔块、扫查装置、试块及其他附件，参考图 2.1。上述设备应具有产品质量合格证或制造厂家出具的合格文件，且超声仪器应在有效的校准期内。

PAUT 检测设备除满足本节的要求外，还应满足 JB/T10061 和 CB/T3559 中的相关要求。

#### 3.1.1 超声仪器

3.1.1.1 脉冲发生器应满足下列要求：

- (1) 发射脉冲参考第 2.1.1.1 中 (1)、(2) 的要求。
- (2) 脉冲重复频率应可调，最大值不小于 2KHz。
- (3) 所有激励通道的发射脉冲电压具有一致性，最大偏移量应不大于设置值的 5%。
- (4) 相邻通道间的串扰应不大于 -30dB。
- (5) 各通道的发射脉冲延迟精度不大于 5ns

3.1.1.2 信号接收器的要求，参考 2.1.1.2 中的 (1)、(2) 要求

3.1.1.3 数字化应满足下列要求：

- (1) 信号的数字化采样频率  $\geq 8$  倍探头标称频率
- (2) 采样位数、信号幅度编码显示、A 扫信号的延迟和窗口范围、外触发参考 2.1.1.3 中 (1)、(2) 要求。

3.1.1.4 使用的软件应具有下列功能：

- (1) 软件应具有聚焦法则仿真、导入或设置计算功能。
- (2) 软件应至少有 A, B, C, D, S, E 等视图或成像方式。
- (3) 仪器应具有增益补偿功能，能进行 ACG 及 TCG/DAC 校准。
- (4) 推荐具有视频平滑功能。
- (5) 采集存储的原始数据应能够以不可更改的方式进行复制。

### 3.1.2 探头

3.1.2.1 探头使用应符合下列要求：

- (1) 普通一维线阵探头晶片数一般不少于 8 个，特殊设计的探头（如环形、扇形面阵探头等）不受此限制。
- (2) 探头中心频率的实测值与标称值的误差不大于 10%，-6dB 相对带宽不小于 60%。
- (3) 使用的偏转角度内，阵元周期的理论波束不应产生栅瓣。
- (4) 各阵元的中心频率、带宽、灵敏度的一致性不大于平均值的 5%
- (5) 相邻晶片的串扰不大于 -30dB
- (6) 单组聚焦法则所使用的晶片中，损坏晶片的数量不允许大于所使用晶片总数的 10%，且不允许相邻晶片损坏。

### 3.1.3 楔块

3.1.3.1 进行斜入射检测时，一般应使用斜楔块满足波束偏转要求。

3.1.3.2 楔块前端应设计吸声区域，防止发射信号在楔块内形成多次回波。

3.1.3.3 检测面是曲面时，所使用的楔块应满足 2.1.3 中 2.1.3.5 的要求

### 3.1.4 试块

3.1.4.1 PAUT 技术使用的试块包括标准试块、对比试块和模拟试块。

3.1.4.2 试块材料应满足 2.1.4 中 2.1.4.2 的要求

3.1.4.3 检测面是曲表面时，试块应满足 2.1.4 中 2.1.4.4 的要求。

3.1.4.4 具体的试块设计参考附录 3。

### 3.1.5 扫查装置及编码器

3.1.5.1 扫查装置应保持探头沿预设的扫查路径平稳移动。

3.1.5.2 半自动或自动检测时，应保证探头扫查移动与编码器计数同步。

3.1.5.3 自动检测时，编码信号满足第 5.1.5 节中的要求 c.

## 3.2 检测工艺设计

### 3.2.1 检测规程

3.2.1.1 PAUT 检测规程主要包括以下内容：

- (1) 确定检测目的(检测任务、检测位置、依据标准、检测级别、验收等级等)；
- (2) 确定产品范围(工件形状、规格、材质、壁厚、焊接工艺等)；
- (3) 工艺设计(主机型号、探头/楔块、扫查装置、试块、聚焦法则、扫查路径、横向缺陷补充检测等)；
- (4) 参数设置及校准；
- (5) 工艺验证；
- (6) 检测准备；
- (7) 扫查和数据采集；
- (8) 数据分析和判读；
- (9) 缺陷评价和质量分级。

### 3.2.2 检测级别

3.2.2.1 PAUT 技术的检测级别由低到高分为 A，B，C，D 四个级别，详细要求见

表 3.2.2.1。

3.2.2.2 所有检测级别，均要求实现波束对检测区域的完整覆盖。

3.2.2.3 若客观条件限制，不能满足相应级别的要求，则应按照 D 级要求，制定专用检测工艺，并报 CCS 批准。

表 3.2.2.1 不同检测级别的要求

检测级别	母材厚度/mm	焊缝类型	检测位置	扫描类型	横向缺陷	
A 级	≤50	对接焊缝	单面单侧	S-Scan 或 E-Scan	必要时	
		角焊缝 T 型焊缝	单面单侧	S-Scan 或 E-Scan	必要时	
		B 级	≤100	对接焊缝	单面双侧 单面单侧	S-Scan 或 E-Scan S-Scan 和 E-Scan
角焊缝 T 型焊缝	单面单侧			S-Scan 和 E-Scan	必要时	
>100	对接焊缝			双面双侧	S-Scan 或 E-Scan	必要时
	角焊缝 T 型焊缝		单面双侧	S-Scan 和 E-Scan	必要时	
	C 级		≤100	对接焊缝	单面双侧	S-Scan 和 E-Scan
角焊缝 T 型焊缝				腹板单面和 面板外侧	S-Scan 和 E-Scan,	必须
>100		对接焊缝		双面双侧	S-Scan 和 E-Scan	必须
		角焊缝 T 型焊缝	腹板双面和 面板外侧	S-Scan 和 E-Scan	必须	
		D 级	特定检测工艺			
注 1: E-Scan 指使用两个不同角度的线性扫描波束进行检测						
注 2: 对于 C 级检测中的角焊缝和 T 型焊缝，横向缺陷的检测可在腹板焊缝侧进行小角度斜向扫查，或者在腹板或者面板上在焊缝上方进行平行扫查。						

### 3.2.3 检测区域

3.2.3.1 检测区域的高度为工件厚度

3.2.3.2 检测区域的宽度应为焊缝宽度加上焊缝两侧各 10mm 的区域或热影响区（取较大者）。

3.2.3.3 缺陷进行复检或精确定量时，检测区域可适当缩小。

3.2.3.4 应在检测报告中用示意图标明检测区域

### 3.2.4 探头

3.2.4.1 探头频率应根据表 3.2.4.1 要求选择。

表 3.2.4.1 探头频率

板厚(mm)	频率(MHz)
$6 \leq T < 10$	10
$10 \leq T < 50$	5-10
$T \geq 50$	2-5

3.2.4.2 焊缝检测时，一般选用一维线性阵列探头。

3.2.4.3 晶片尺寸和数量应按下列要求选择：

(1) 选择较大晶片尺寸可获得较高的检测灵敏度和更大的聚焦深度，但晶片尺寸不应过大，以避免形成较大阵元周期，产生栅瓣；一般要求阵元周期小于半波长。

(2) 晶片数量应满足探头激活孔径大小和 E-Scan 中对扫描覆盖范围的要求，探头激活孔径大小对应的晶片数量不能超过选用设备的激励通道数量。

### 3.2.5 楔块

3.2.5.1 典型的相控阵楔块有  $0^\circ$ ， $45^\circ$ ， $55^\circ$ ， $60^\circ$ 等，选择的楔块角度应尽量对应 E-Scan 的波束角度或者 S-Scan 偏转角度范围的中间值。



## 3.2.6 聚焦法则设计

### 3.2.6.1 检测波束覆盖应满足下列要求：

- (1) 通常使用 CAD 绘图或相关无损检测仿真软件进行检测波束覆盖设计，应保证设计的检测波束完整覆盖焊缝的检测区域。若不能满足要求，则应增加辅助扫查或其他检测方法。
- (2) 采用 B 级和 C 级检测时，不同扫描设置间的重叠区域应尽可能大。
- (3) 必要时增加针对特定位置或特定缺陷的专用检测通道设置
- (4) 通常情况下，单次激发的晶片数应不少于 8 个。

### 3.2.6.2 S-Scan 偏转范围应满足下列要求：

工艺设计时应应对实际探头的波束偏转能力进行实验验证。设计聚焦法则时，只允许使用经过验证的波束角度范围。一般情况下，推荐的横波 S-Scan 的角度偏转范围为 40-75 度。

说明：随 S-Scan 中偏转角度增大，波束分辨力下降，角度误差变大

### 3.2.6.3 选择聚焦深度主要考虑因素：

- (1) 聚焦深度一般应设置为工件板厚的 2 倍。若关注声程较短的缺陷，则使用的探头孔径不应过大。
- (2) 相控阵技术只能实现探头近场区内的聚焦。若需要对特定深度的缺陷进行聚焦检测，可将聚焦深度设置在缺陷深度处，但会造成其他位置检测灵敏度的急剧下降。
- (3) 若条件允许，推荐使用动态深度聚焦（DDF）功能，改善波束分辨率。

3.2.6.4 推荐设置耦合监视通道，监测扫查过程中探头/楔块在工件表面的耦合状态。

## 3.3 参数设置

### 3.3.1 聚焦法则

3.3.1.1 应根据事先确定的检测参数正确设置聚焦法则，如使用多组聚焦法则，则

对每组使用的晶片数量及序号、波束偏转角度及聚焦位置等信息进行设置。

附录 5 中详细描述了探头激励孔径和聚焦深度对 S-Scan 成像结果的影响。

### 3.3.2 脉冲发生器和信号接收器

3.3.2.1 脉冲发生器和信号接收器的使用应符合下列要求：

- (1) 激励电压：参照 2.3.2 中 2.3.2.1 的相关要求。
- (2) 脉冲宽度：应根据探头频率、检测灵敏度和信噪比等调节脉冲宽度。
- (3) 滤波：参照 2.3.2 中的 2.3.2.1 的相关要求。
- (4) 推荐使用视频平滑功能，改善扫描图像质量。

### 3.3.3 显示范围视图选择

3.3.3.1 显示范围的设置应使焊缝检测区域位于其中，并移除过多的无效扫描区域，如图 3.3.3.1 所示。推荐使用 A-S-B 或者 A-E-B 视图组合。

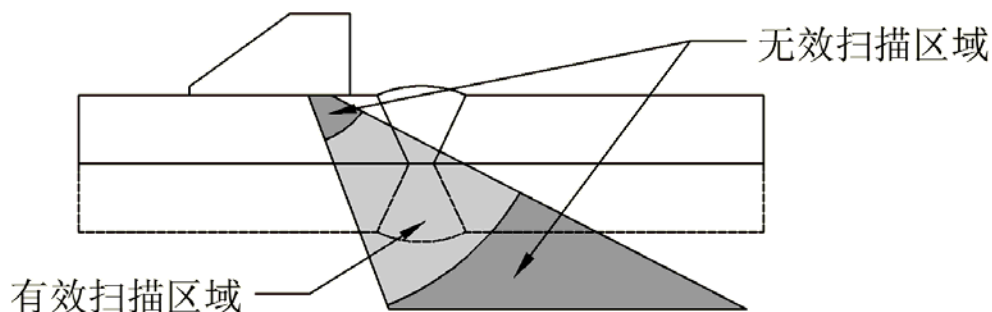


图 3.3.3.1 显示范围示意图

### 3.3.4 灵敏度设置

3.3.4.1 应在对比试块上调整检测灵敏度，具体过程详见附录 4。

### 3.3.5 数字化

3.3.5.1 采样频率和采样位数满足 2.2.6.3 (1) 和 2.2.6.3 (2) 要求。

3.3.5.2 相控阵检测时，应使用全波检波信号。

### 3.3.6 扫查设置

3.3.6.1 根据工件板厚范围，设置相应的扫查步进量或扫查分辨率，具体数值参照表 3.3.6.1。

表 3.3.6.1 扫查分辨率

板厚 t/mm	最大扫查步进/mm
$t < 10\text{mm}$	1.0
$10 \leq t < 150$	2.0
$t \geq 150$	3.0

## 3.4 校准

PAUT 技术的校准包括被检材料声速、楔块延迟、灵敏度和编码器的校准，以获得更精确的检测结果。详细校准过程及步骤举例详见附录 4。

### 3.4.1 晶片检查

3.4.1.1 实施校准前，应对探头拟使用的晶片进行检查，典型的晶片检查扫描图像如图 3.4.1.1 所示。

3.4.1.2 所使用的晶片中，损坏晶片数量不大于使用总数的 10%，且不允许相邻晶片损坏。

3.4.1.3 所使用的晶片灵敏度偏差不大于 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。

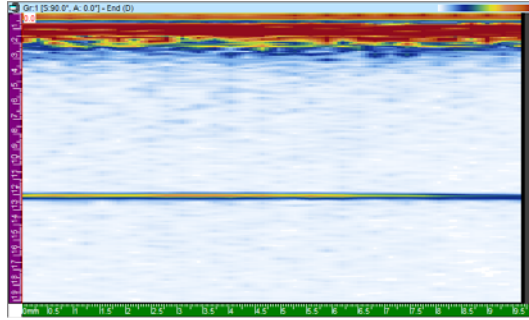


图 3.4.1.1 晶片检查扫描图像

### 3.4.2 声速及楔块延迟校准

3.4.2.1 声速及楔块延迟校准后，设备在试块上 3mm 孔的深度及水平定位精度不大于 1mm。

### 3.4.3 编码器校准

3.4.3.1 参照条款 2.3.3，对编码器进行校准。

### 3.4.4 灵敏度及 TCG 校准

3.4.4.1 相控阵灵敏度 TCG 校准后，各波束一致性误差不大于 $\pm 5\%$ 满屏高。

### 3.4.5 系统显示检查

3.4.5.1 系统显示检查应满足下列要求：

- (1) 设备校准后，应进行系统显示检查。
- (2) 系统显示检查应在试块上进行。
- (3) 试块上标准反射体的深度及水平位置偏差要求不大于 1mm，信号幅度偏差不大于 5%。
- (4) S-Scan 应对最小角度、中间角度及最大角度波束进行检查。
- (5) E-Scan 应对两条边缘波束进行检查。
- (6) 每条波束上的检查点不少于 2 点，一般选择显示范围的中间点和远点。

## **3.5 现场数据采集**

### **3.5.1 表面状态**

3.5.1.1 参照条款 2.4.1.1，规定数据表面状态应满足具体的要求。

### **3.5.2 检测位置标记及检测方向**

3.5.2.1 参照条款 2.4.2，规定检测位置标记及检测方向应满足具体的要求。

### **3.5.3 母材检测**

3.5.3.1 C 级检测前，应对焊缝两侧波束可能通过的母材位置进行直波束检测。对母材中存在影响声能传播的缺陷应予以记录。

3.5.3.2 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。

3.5.3.3 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。

### **3.5.4 耦合剂**

3.5.4.1 参照条款 2.4.4.1，规定使用的耦合剂应满足相关要求。

### **3.5.5 温度**

3.5.5.1 参照条款 2.4.5，规定数据采集时使用温度应满足相关要求。

### **3.5.6 扫查和数据采集**

3.5.6.1 参照条款 2.4.6.1，规定使用扫查速度应满足相关要求。

3.5.6.2 参照条款 2.4.6.2，规定使用扫查覆盖应满足相关要求。

3.5.6.3 扫查时应保证实际扫查路径与拟扫查路径的水平偏差不大于 2mm。

3.5.6.4 重新扫查应在下列情况下实施：

- (1) 数据质量不合格，具体要求参见 3.8。
- (2) 扫查长度与实际长度的误差超过扫查长度的 1%或 5mm(取较小值)。
- (3) 扫查偏移超过第 6.5.6.3 节的要求。

3.5.6.5 参照条款 2.4.6.5，规定使用检测系统校验应满足相关要求。

## 3.6 文件存储

见 2.5。

## 3.7 数据判读

### 3.7.1 数据有效性检查

3.7.1.1 数据判读前，应检查数据质量，保证数据有效性。

3.7.1.2 数据丢失量不超过检测长度的 5%，且不允许相邻扫查点的数据丢失。

3.7.1.3 扫查范围内噪声信号不应突然消失，或者耦合监视通道信号异常；若存在楔块固定波、横向焊缝、其他结构等，应在检测记录中予以注明。

3.7.1.4 数据长度应与扫查长度一致，分段扫查时前后数据应有至少 20mm 重叠。

3.7.1.5 扫查步进应符合设定值。

3.7.1.6 显示范围应包含检测区域。

3.7.1.7A 扫信号的噪声不应大于 20%满屏高。

### 3.7.2 缺陷分类与记录

3.7.2.1 缺陷识别应按下列要求执行：

(1)根据焊缝结构特征，或参考仿真图像，识别结构信号(非相关显示)和缺陷信号(相关显示)。

(2)缺陷性质一般应结合具体焊接工艺、缺陷位置及信号图像特征等进行判断。

附录 6 为典型缺陷图像。

3.7.2.2 根据危害程度不同，缺陷分为危害性缺陷和非危害性缺陷。

危害性缺陷主要包括裂纹、未熔合、未焊透等；非危害性缺陷主要包括气孔、夹渣/杂等。

3.7.2.3 缺陷记录应包括下列内容：

(1) 缺陷类型(缺陷性质，表面开口/底面开口/贯穿型/埋藏型，点状/线状/面状等)。

(2) 缺陷的位置、长度和深度。

(3) 缺陷的分布特征(单点、散布、密集等)。

3.7.2.4 缺陷定位应包括下列内容：

(1) 缺陷位置：在扫查方向上的起始点。

(2) 缺陷深度：距离扫查面的最小深度值。

(3) 水平位置：缺陷最小深度处距离焊缝中心线的位置。

3.7.2.5 缺陷定量应包括下列内容：

(1)回波幅值：缺陷的最高回波幅度值，若 A 扫信号饱和，应如实记录。

(2)缺陷长度：应使用 6dB 法对缺陷进行测长。当使用 6dB 法测长时，对于单个波峰的缺陷显示，按照峰值降低 6dB 的方法进行测长；对于多个波峰的缺陷，按照端点峰值降低 6dB 的方法进行测长。对饱和的 A 扫信号，可按 100%全屏高度处理。

## 3.8 质量等级和验收标准

3.8.1 所有危害性缺陷，如裂纹，未焊透，未熔合等均评定为不合格。

3.8.2 所有横向缺陷均评定为不合格。

3.8.3 单个缺陷质量分级

PAUT 检测时，波幅超过  $\text{Ø}3\text{-}14\text{dB}$  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 3.8.3 进行验收。

PAUT 检测质量分级 表 3.8.3

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	03-4dB~03	不大于 0.5t 或 20mm (取小者)	03-4dB
			03-10dB~03-6dB	不大于 t 或 20mm (取小者)	03-10dB
			03-14dB~03-10dB	不大于 2.5t 或 20mm (取小者)	03-14dB
2 级	C 级	3 级	03~03+4dB	不大于 0.5t 或 30mm (取小者)	03
			03-6dB~03-2dB	不大于 t 或 30mm (取小者)	03-6dB
			03-10dB~03-6dB	不大于 2.5t 或 30mm (取小者)	03-10dB
3 级	超过以上限值者				

\* 当采用本指南以外的验收标准时, 需经 CCS 认可

### 3.8.4 临近缺陷

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 3.8.4 所示。

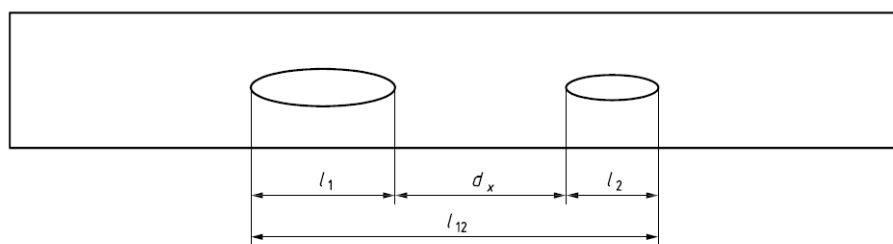


图 3.8.4 PAUT 检测时的临近缺陷

### 3.8.5 缺陷累计长度

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 3.8.5 的规定进行质量评级。

PAUT 累计缺陷长度的评级表 3.8.5

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		



### 3.8.6 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。

### 3.8.7 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。

## 3.9 报告和归档

### 3.9.1 被检工件中至少应包含以下内容：

- (1)工程名称
- (2)被检工件的名称，规格，材料，状态  
焊缝坡口形式

### 3.9.2 硬件名称中至少应包含以下内容：

- (1)主机名称及识别号
- (2)探头名称及识别号
- (3)编码器识别号
- (4)试块名称及识别号

### 3.9.3 参数设置应包括以下几项内容：

- (1)参考标准
- (2)检测级别
- (3)灵敏度设置方法
- (4)探头频率
- (5)探头孔径
- (6)楔块角度
- (7)扫描类型
- (8)角度范围
- (9)探头相对于焊缝的位置

(10)焊缝波束覆盖示意图

(11)编码器分辨率

(12)试块验证数据

### 3.9.4 检测报告应包括以下几项内容：

(1)设置名称

(2)检测类型

(3)检测时机

(4)表面状况

(5)耦合剂

(6)检测温度

(7)扫查增量

(8)检测位置及编号方式

(9)检测方向

(10)检测人员姓名、签字、级别及检测日期

### 3.9.5 缺陷评定报告应包括以下几项内容：

(1)使用的数据判读软件名称及版本

(2)参考标准

(3)验收级别

(4)所使用的数据处理功能

(5)缺陷位置、距焊缝中心线距离、长度和深度

(6)合格与否

(7)超标缺陷的扫描图像

(8)数据判读人员姓名、签字、级别及日期

(9)报告审核人员姓名、签字、级别及日期

## 附录 1 TOFD 技术局限性

### A1.1 TOFD 技术对材料特性敏感

TOFD 衍射信号微弱，增益较高，使焊缝及母材中的晶粒噪声放大，造成检测信噪比较低，缺陷识别困难。目前 TOFD 技术仅用于碳钢及其他细晶材料的检测，铸钢及不锈钢等粗晶材料不适用。

### A1.2 检测对象结构单一，目前仅适用于平板或者管对接焊缝。

TOFD 技术要求一发一收的两个探头对称布置，故对不等厚焊缝、角焊缝、T 型焊缝及管节点焊缝检测时存在困难。检测不等厚焊缝时，定位及定量误差增大；角焊缝及 T 型焊缝等因探头无法放置于同一平面，需要特殊的检测工艺，且伴有诸多局限性，目前较少采用。

### A1.3 单次扫查不能确定缺陷的准确位置、深度及高度。

TOFD 检测和定位缺陷依赖于信号到达时间，按照三角几何关系计算内部衍射信号与直通波的时间差，进行深度坐标的线性化。理论上，缺陷回波位置位于以发射/接收两个波束主轴的出射/接收点为焦点的椭圆之上，如图 A1 中椭圆所示。单次扫查时，通常假定缺陷位于焊缝中心线上，计算缺陷深度及高度值，因此对偏离焊缝中心线的缺陷会带来误差，偏离越远，误差越大，如图 A1 所示。

### A1.4 存在上下表面盲区

直通波具有一定的持续宽度，位于近表面的缺陷因渡越时间与直通波传播时间接近，其衍射波将淹没于直通波中，导致缺陷漏检。该盲区称为上表面盲区。检测位于焊缝中心线两侧、靠近底面的缺陷时，衍射回波的渡越时间可能大于底面反射波的到达时间，从而使缺陷衍射回波淹没于底面反射波之中，造成漏检，该盲区称为下表面盲区，如图 2.1 所示。对上表面盲区，应辅以其他检测技术手段予以补充，如常规超声，相控阵超声，磁粉等。使用表面检测手段时，应对表面检测手段的有效检测深度予以确认。TOFD 的下表面盲区相对较小，当检测级别较高时，应采用偏置非平行扫查予以补充。当检测级别较低时，可以忽略。

### A1.5 难以检测横向缺陷

TOFD 技术检测横向缺陷时，其显示特征为微小弧线，当焊缝中存在其他缺陷时，与其他缺陷信号混合，难以分辨。

### A1.6 焊缝中心线两侧缺陷信号重叠，无法进行水平方向定位。

当仅使用标准非平行扫查时，焊缝中的所有缺陷将在垂直焊缝方向叠加显示在一个 B 扫描图像，如在图 A1 同一椭圆上的缺陷 1 及缺陷 2 会在 B 扫描上显示在同一位置并叠加，使缺陷难以分辨。

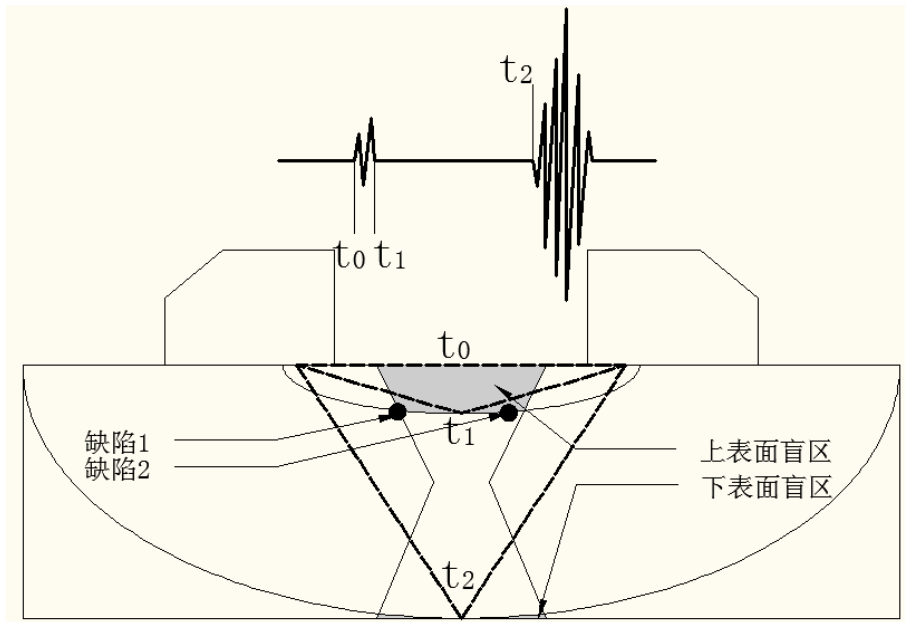


图 A1 TOFD 检测原理及盲区示意

## 附录 2 TOFD 图像的基本特征与缺陷测量方法

### A2.1 数据质量

#### A2.1.1 增益过高或过低

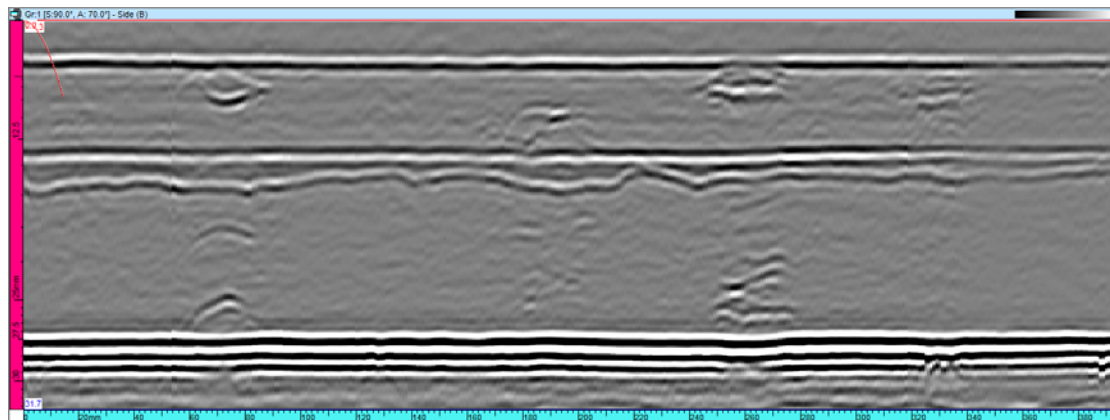


图 A2.1 TOFD 检测 B 扫描图像(增益适当)

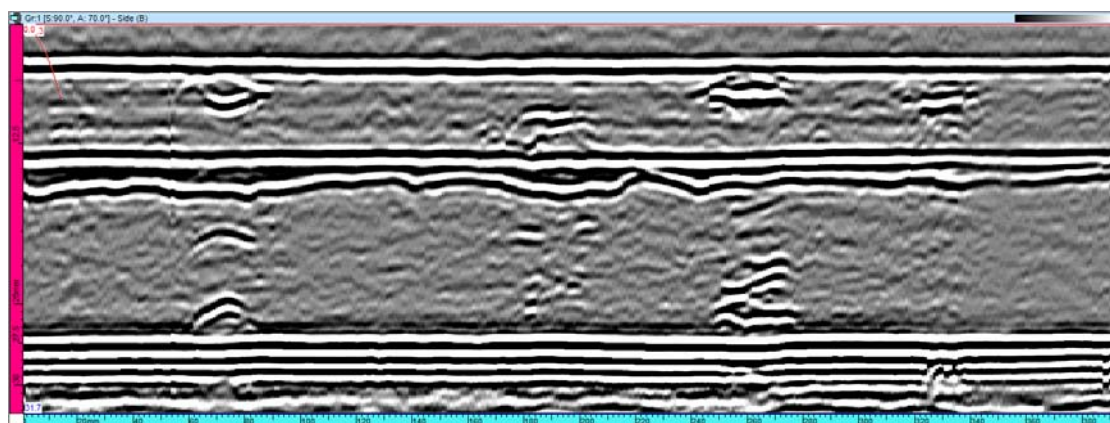


图 A2.2 TOFD 检测 B 扫描图像(增益过高)

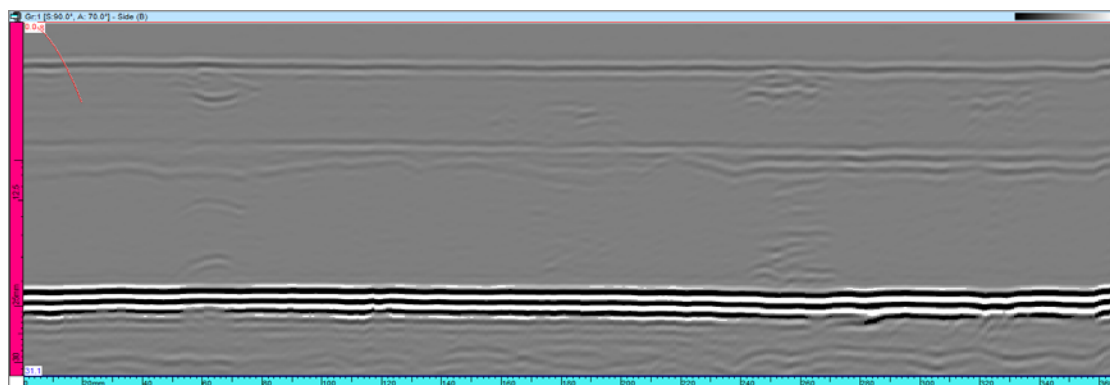


图 A2.3 TOFD 检测 B 扫描图像(增益过低)

### A2.1.2 显示范围不当

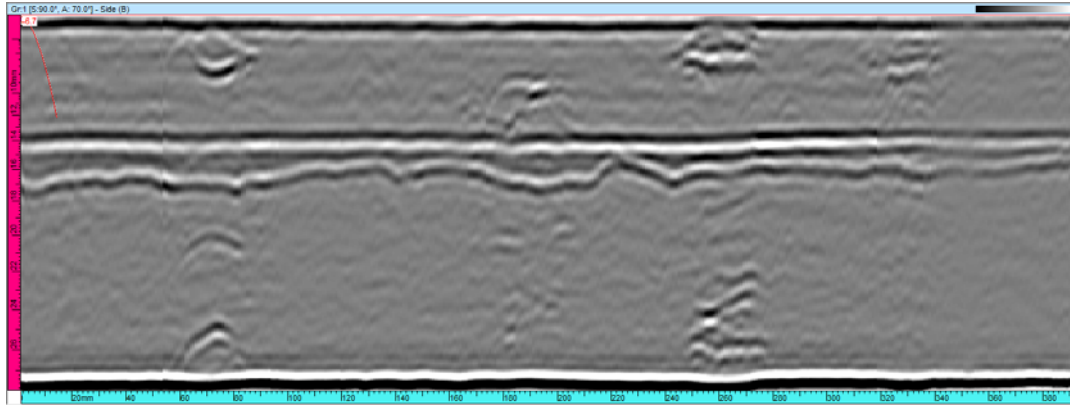


图 A2.4 显示范围设置不当(直通波和波型转换信号不完整)

### A2.1.3 时基同步异常

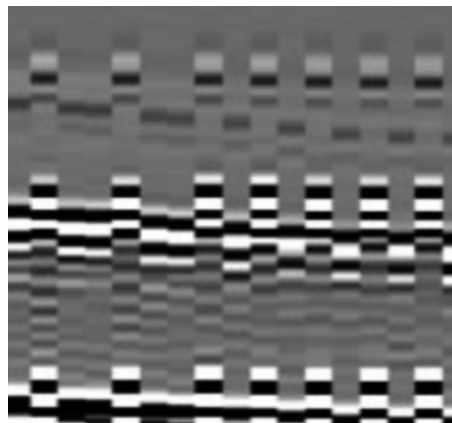


图 A2.5 时基同步异常

### A2.1.4 数据丢失及耦合不良

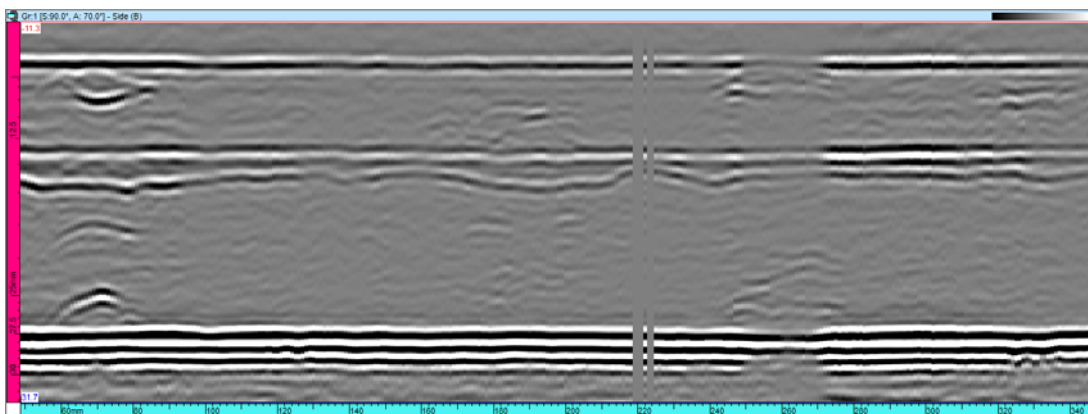


图 A2.6 数据丢失及耦合不良

### A2.1.5 耦合层厚度变化

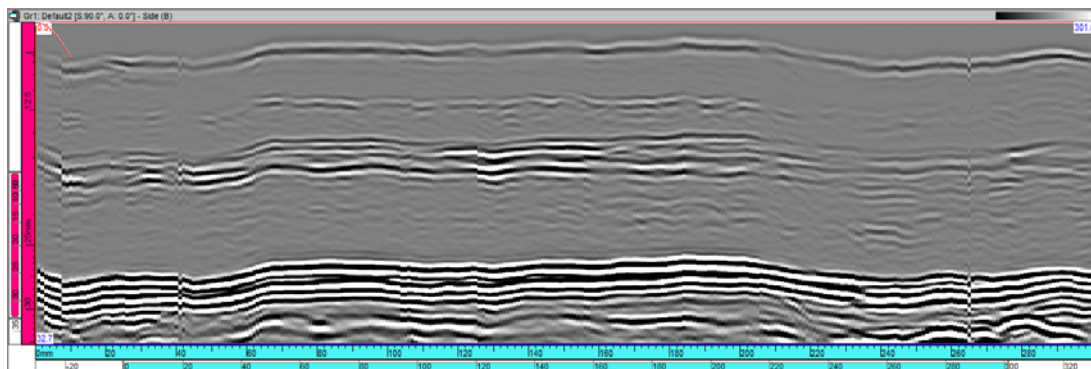
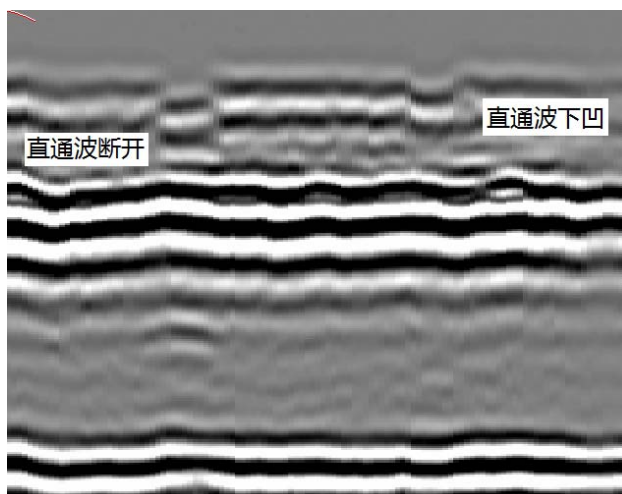


图 A2.7 耦合层厚度变化引起直通波起伏

## A2.2 TOFD 图像中缺陷的基本特征

### A2.2.1 扫查面开口缺陷

较大的扫查面开口缺陷会造成直通波有明显断开，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；当扫查面开口缺陷较小时，也可能表现为直通波下凹。但应区分扫查面开口缺陷与局部耦合不良图像特征的差异，前者不会引起底波的变化，后者会引起同一位置所以信号的起伏。



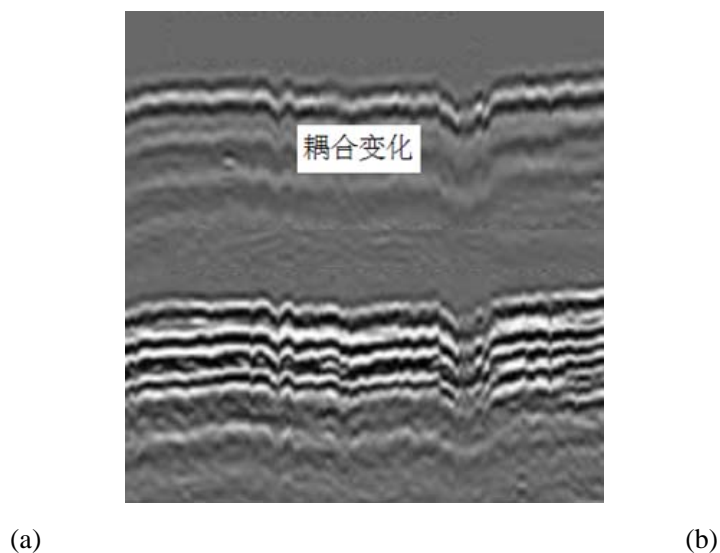


图 A2.8 扫查面开口缺陷(a)与耦合变化(b)

### A2.2.2 底面开口缺陷

较大的底面开口缺陷会造成底面波断开，同时在底面反射波位置产生与直通波相位相反且比底面波时间靠前的缺陷上尖端信号。底面开口缺陷一般不易造成底面波断开，但会使其减弱或产生扰动，或同时出现缺陷上尖端衍射信号。

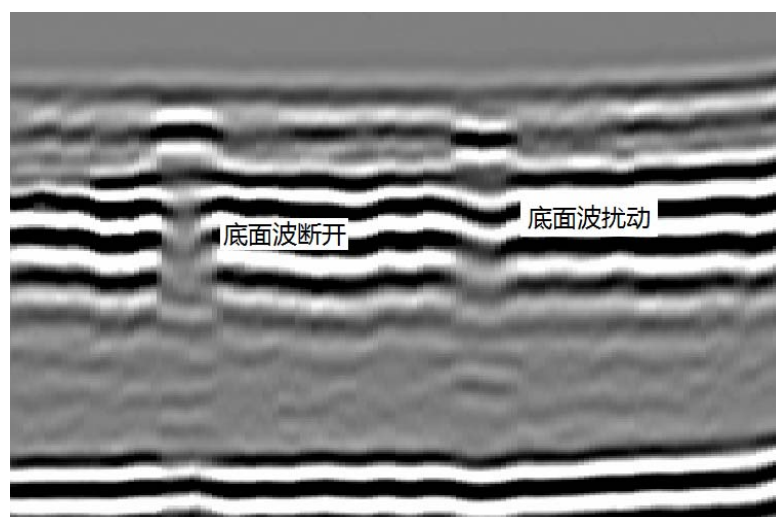


图 A2.9 底面开口缺陷

### A2.2.3 贯穿型缺陷(两面开口)

贯穿型缺陷的主要特征是直通波及底波同时减弱或消失，有时可沿深度方向出现较多衍射信号。注意区分贯穿性缺陷与局部耦合不良的图像特征。



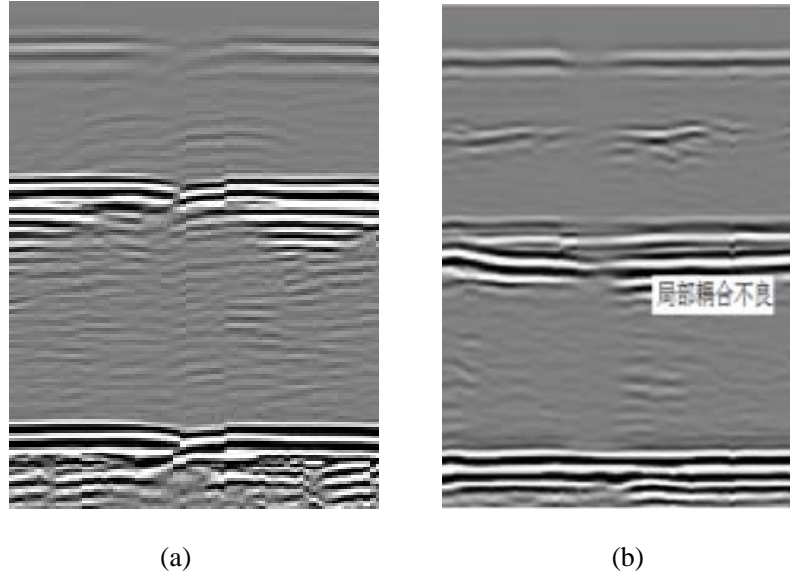


图 A2.10 贯穿型缺陷(a)与局部耦合不良(b)

#### A2.2.4 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，可分为以下四种：

##### 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。

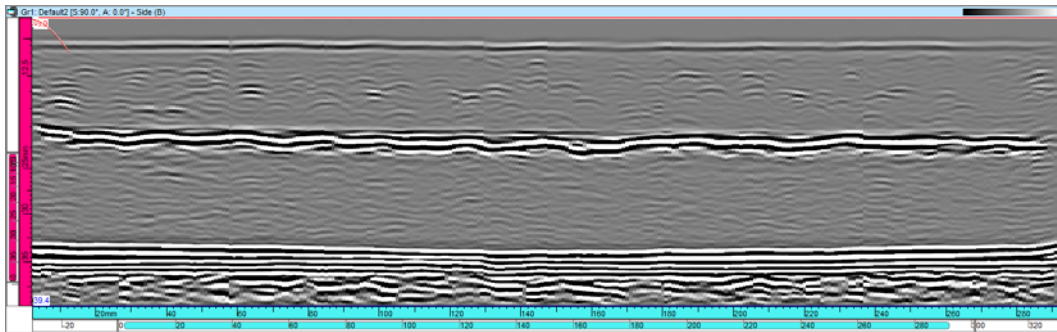


图 A2.11 点状缺陷

##### 2) 线状缺陷

显示一定的长度，但没有可测量的高度。

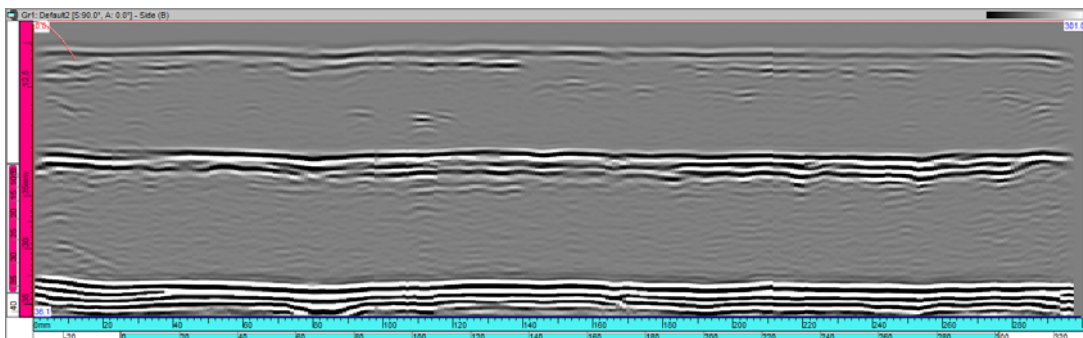


图 A2.12 线状缺陷

### 3) 条状缺陷

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。

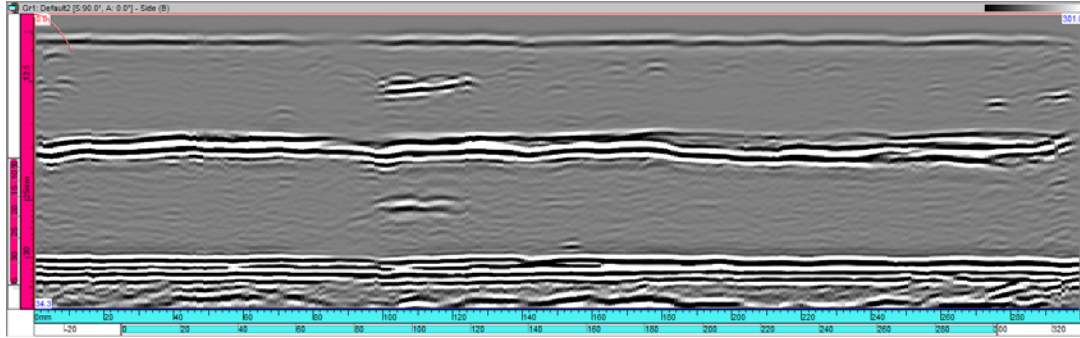


图 A2.13 条状缺陷

## A2.3 缺陷的测量

### A2.3.1 缺陷测长

缺陷测长应使用双曲线指针拟合方法。对显示弧状过长的缺陷，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。

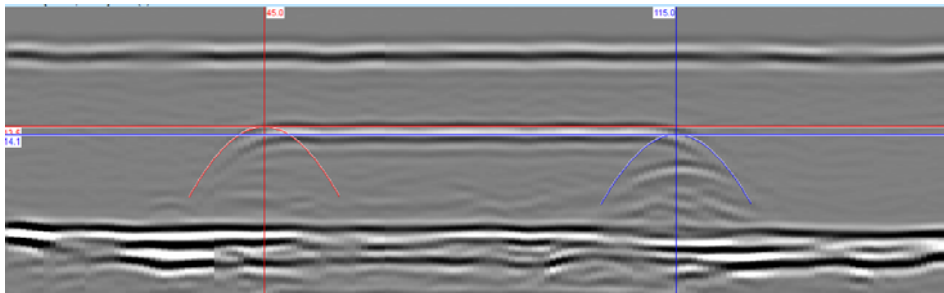


图 A2.14 使用双曲线指针拟合法进行缺陷测长

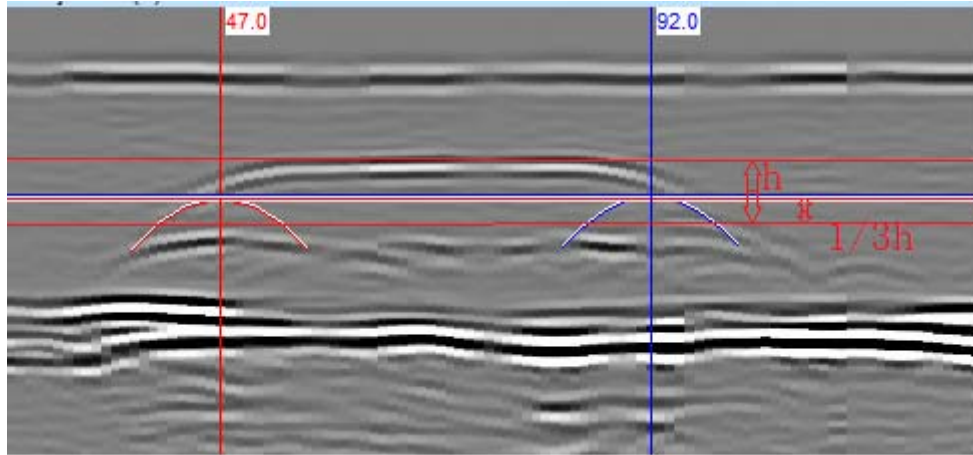


图 A2.15 弧状显示较长的缺陷测长

### A2.3.2 缺陷测深及测高

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。

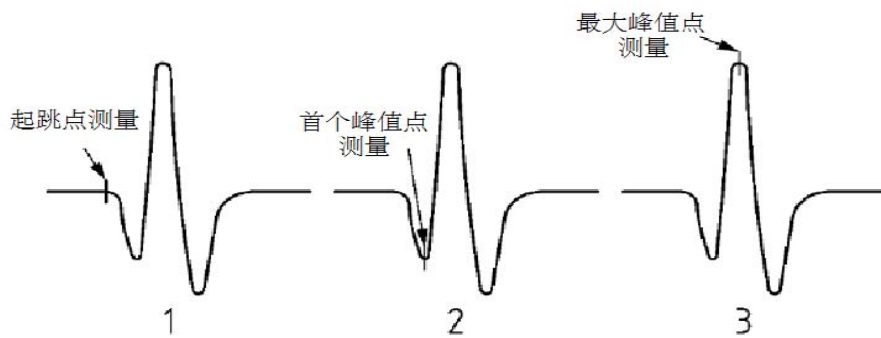


图 A2.16 测量信号时间的方法

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。

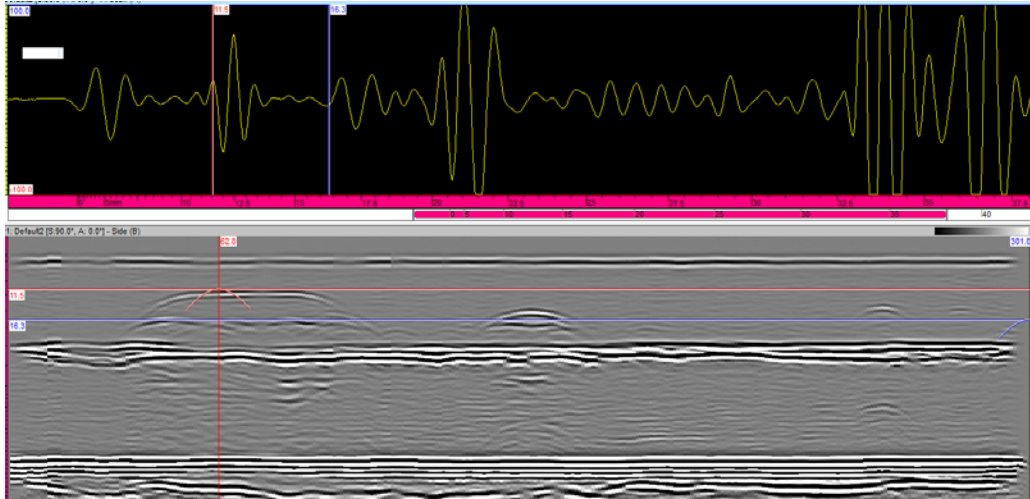


图 A2.17 缺陷测深及测高方法

缺陷深度及自身高度的定义如下图所示，其中  $h_1$  代表缺陷埋藏深度， $h_2$  代表缺陷自身高度：

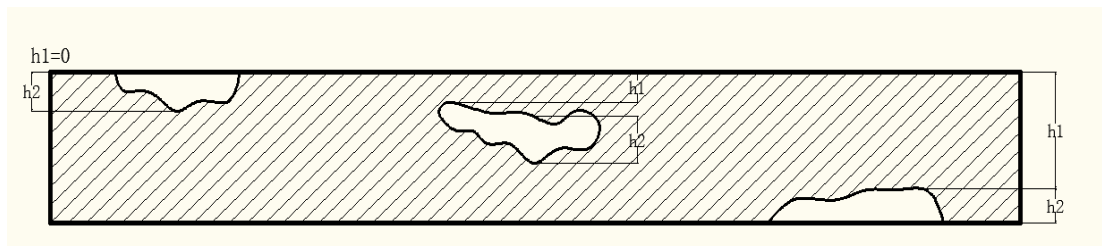


图 A2.18 缺陷深度及自身高度的定义

### A2.3.3 缺陷精确测深及水平定位

通过非平行扫查可获取缺陷在焊缝长度方向上的位置，但单次非平行扫查不能对缺陷进行水平定位。使用平行扫查，能对缺陷进行测深、测高，并进行水平定位。在平行扫查中，反射点的真实深度为显示深度的最小点。

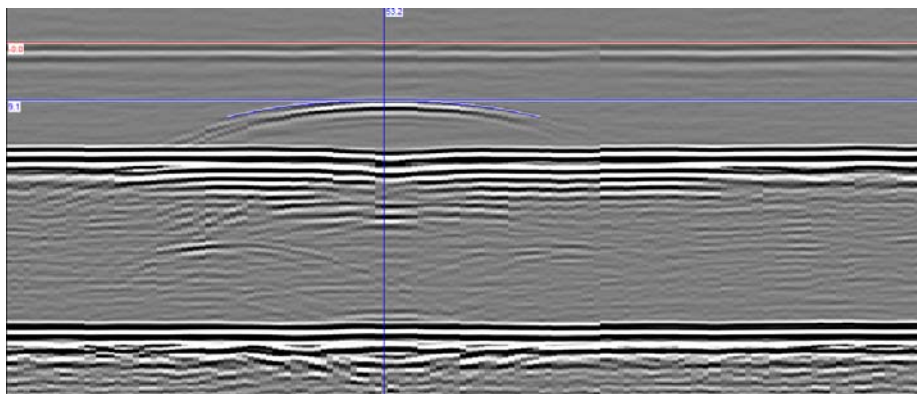


图 A2.19 平行扫查图像及测量方法

## 附录 3 试块

### A3.1 TOFD 对比试块

典型的 TOFD 对比试块如图 A3.1 所示,人工反射体尺寸如表 A3.1, A3.2 和 A3.3 所示。

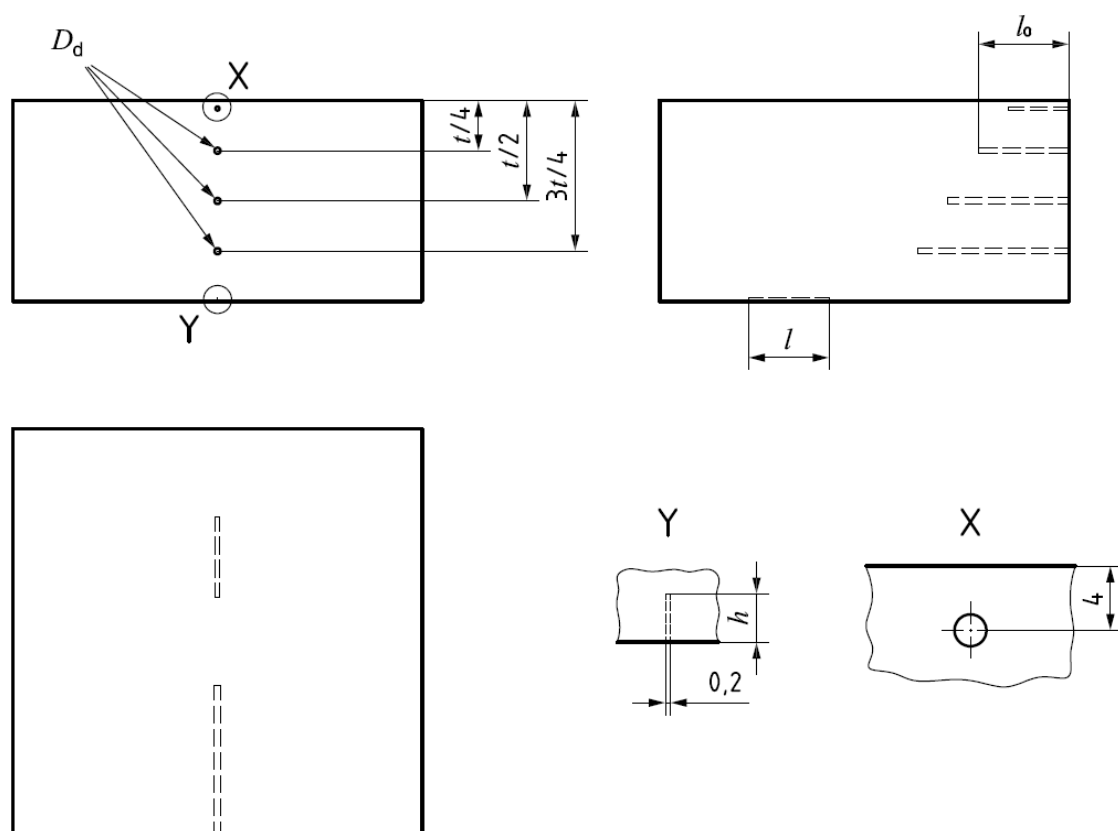


图 A3.1 TOFD 对比试块

表 A3-1 对比试块底面刻槽的尺寸

试块厚度 t/mm	刻槽长度 l/mm	刻槽深度 h/mm
$10 \leq t \leq 40$	t	$1 \pm 0.2$
$40 < t \leq 60$	$40 \pm 2$	$2 \pm 0.2$
$60 < t \leq 100$	$50 \pm 2$	$2 \pm 0.2$
$t > 100$	$60 \pm 2$	$3 \pm 0.2$

表 A3-2 横孔直径

试块厚度 t/mm	横孔直径 $D_d$ /mm
$10 \leq t \leq 25$	$2.5 \pm 0.2$
$25 < t \leq 50$	$3.5 \pm 0.2$
$50 < t \leq 100$	$4.5 \pm 0.2$
$t > 100$	$6.0 \pm 0.2$

表 A3-3 板厚大于 25mm 的横孔长度及表面刻槽尺寸

试块厚度	1 个试块上分布 3 个横孔的最小长度 /mm	3 个试块各有 1 个横孔的最小长度 /mm	3 个试块各有 1 个表明刻槽的最小长度 /mm
t/4	$l_0 = 45$	45	40
t/2	$l_0 + 15$	45	40
3t/4	$l_0 + 30$	45	40

### A3.2 TOFD 盲区试块

盲区试块的标准反射体包括横孔和底面刻槽，其中横孔的直径为 2mm，刻槽宽度为 3mm，为尖角槽。人工伤的深度和位置如图 A3.2 所示。

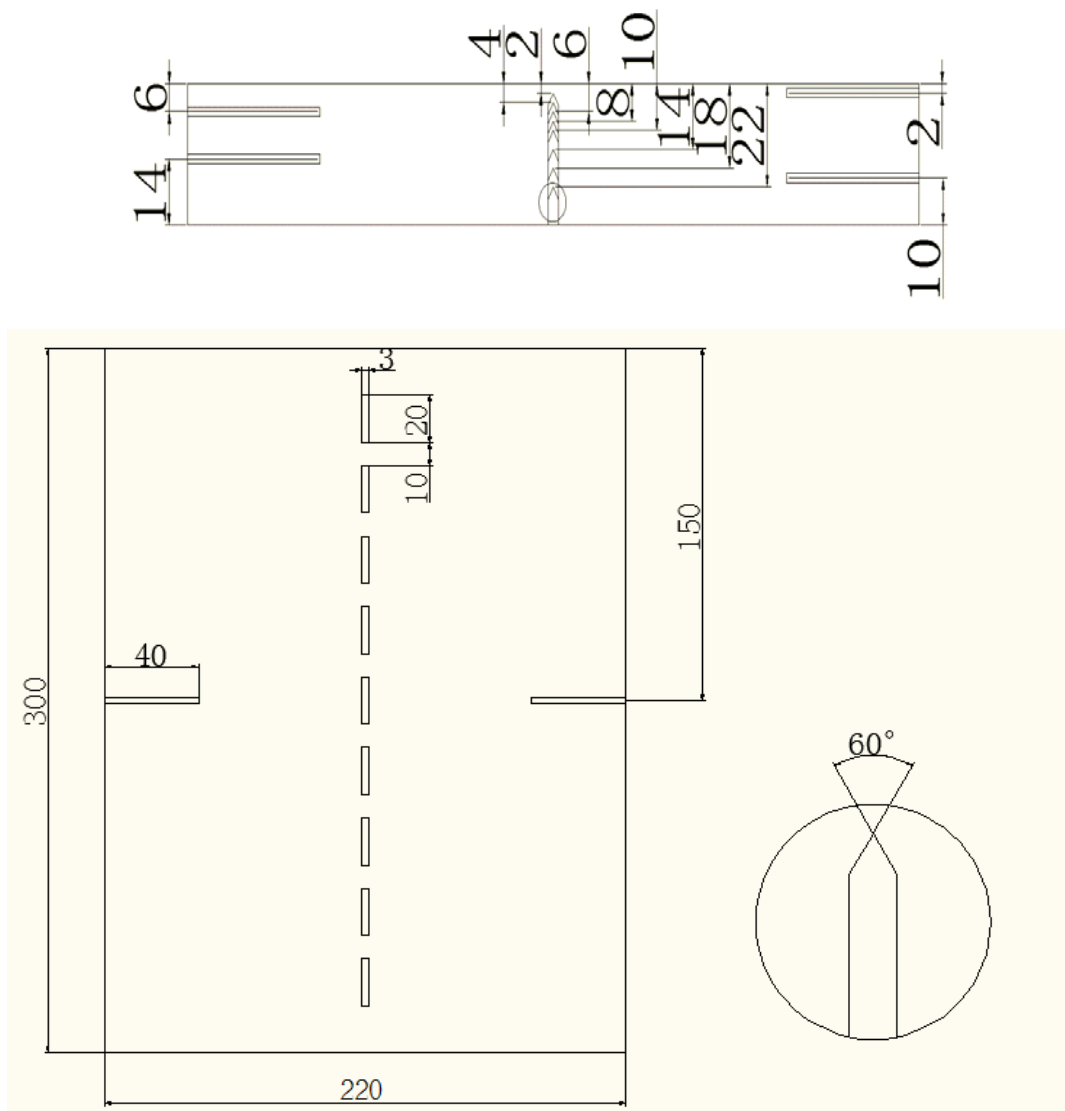
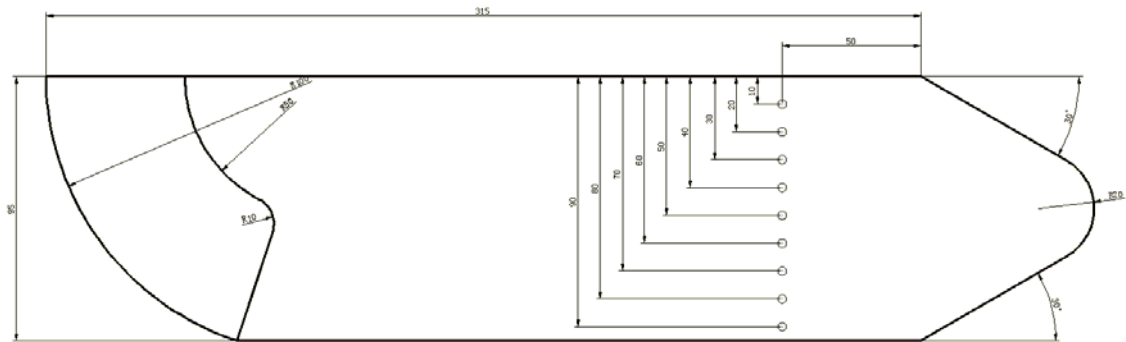


图 A3.2 TOFD 盲区试块

### A3.4 PAUT 对比试块



制作要求:

1. 横孔直径为  $\Phi 3$ ，要求误差不大于 0.2mm。
2. 各尺寸误差不大于 0.2mm。
3. 角度误差不大于 2 度。



## 附录 4 设备校准方法

### A4.1 楔块延时校准

楔块延迟校准应采用对比试块上的 R100 圆弧，如图 A4.1(a)所示。校准时，仪器调节为声程显示模式，前后移动探头使各角度的波束均得到圆弧最高波信号的渡越时间，仪器进行记录，如图 A4.1(b)。使用校准功能调整各波束的时间延迟，使各波束 R100mm 的圆弧半声程均为 100mm。校准完成后再次在同位置前后移动探头，看校准后的楔块延迟误差是否满足要求的误差带如图 A4.1(c)。

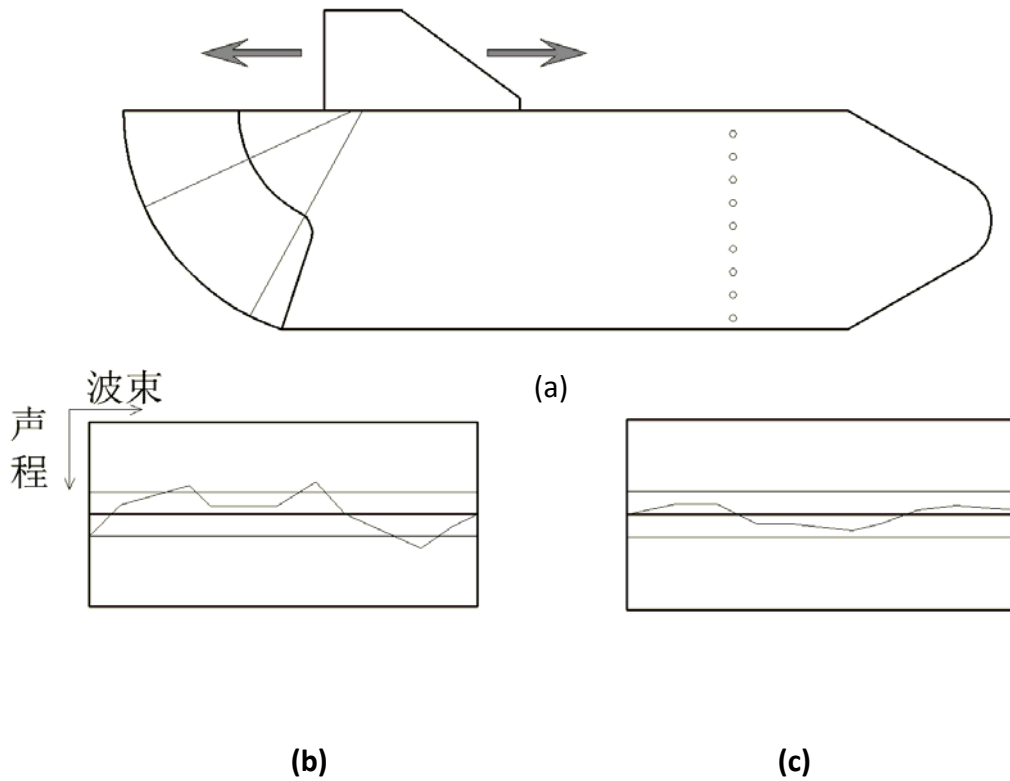


图 A4.1 楔块延迟校准

## A4.2 角度增益校准 (ACG)

角度增益校准应采用对比试块上的 R100 圆弧, 如图 A4.1(a)。校准时, 仪器调节为声程显示模式, 前后移动探头使各角度的波束均得到圆弧最高波信号的波幅, 仪器进行记录。使用校准功能调整各波束的增益值, 使各波束在 R100mm 的圆弧面上反射回波高度均为基准波高。校准完成后再次在同位置前后移动探头, 看校准后的波幅误差是否满足要求的误差带。

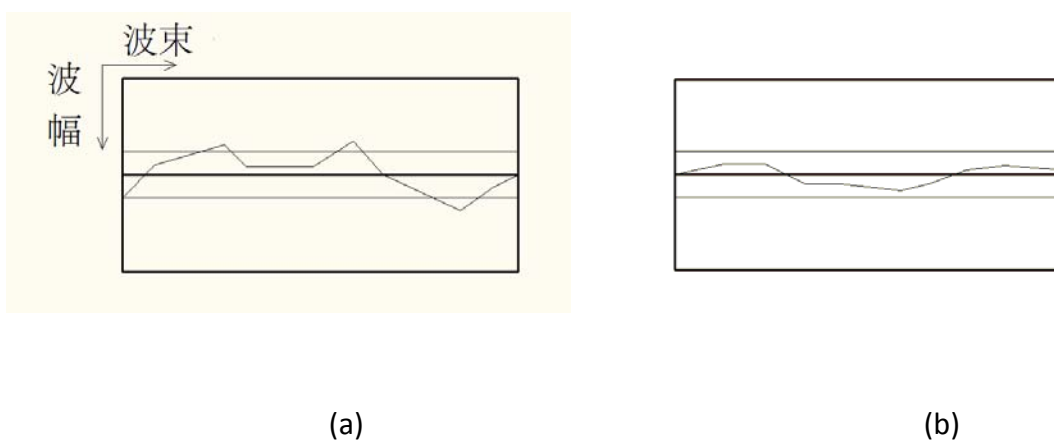


图 A4.2 ACG 校准

### A4.3 TCG 校准

TCG 校准使用试块上不同深度的横通孔，如图 A4.3(a)。校准时，仪器调节为深度显示模式，前后移动探头，使不同角度的波束均采集到某一深度横通孔的最高回波，仪器记录各个回波值，如图 A4.3(b)。使用校准功能调节各条波束的增益值，使不同波束对同一横通孔的回波高度均达到基准回波值。校准完成后再次在同一位置移动探头，检查校准后的结果是否满足校准误差要求，如图 A4.3(c)。

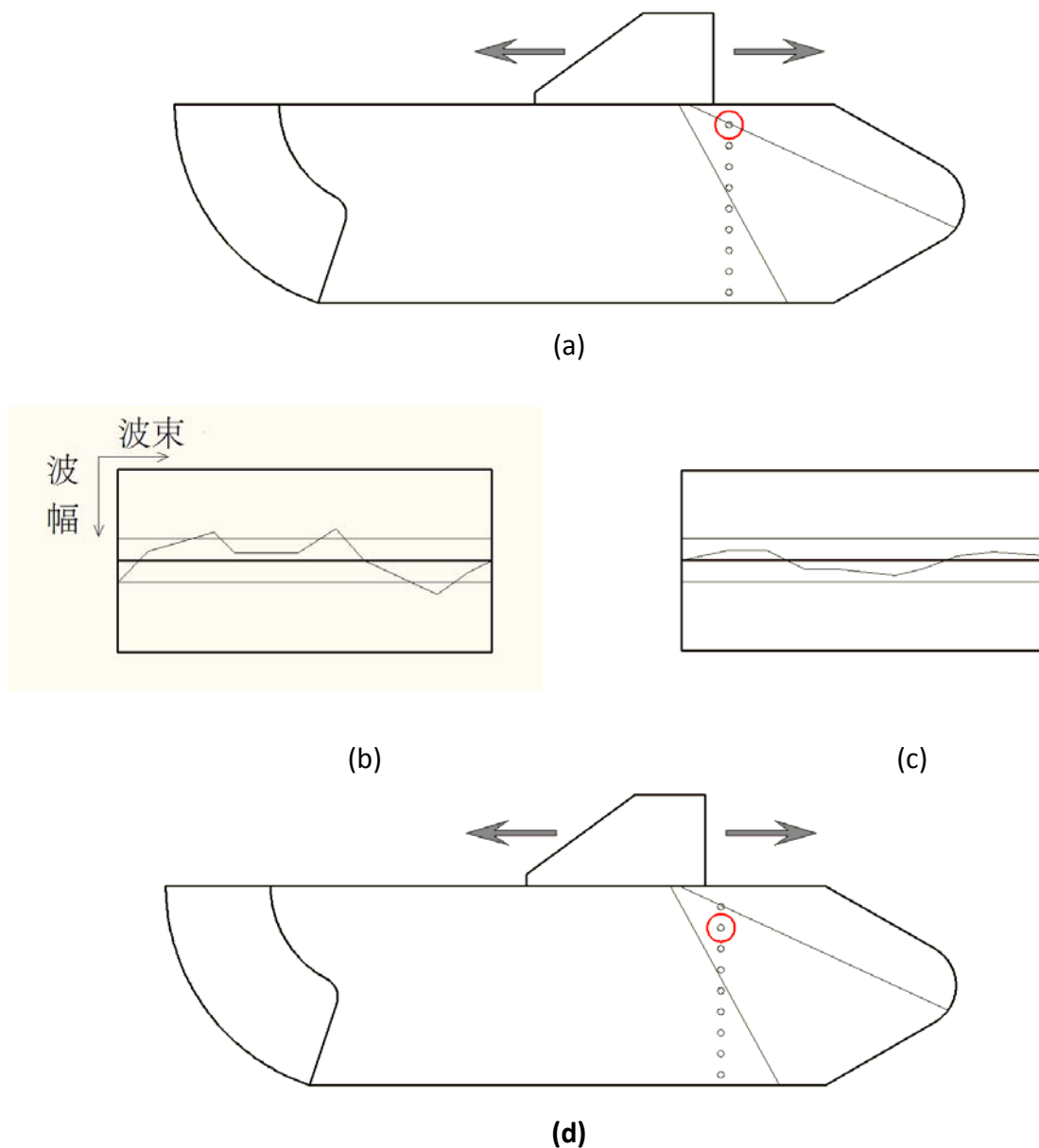


图 A4.3 TCG 校准

重复上述步骤，对第二个深度的横通孔进行校准，如图 A4.3(d)，直至校准深度覆盖检测深度。

#### A4.4 编码器校准

编码器校准时，使编码器移动固定的距离(不小于 500mm)。在仪器中输入移动的长度，仪器根据接收到的脉冲数自动计算编码器分辨率，完成校准。

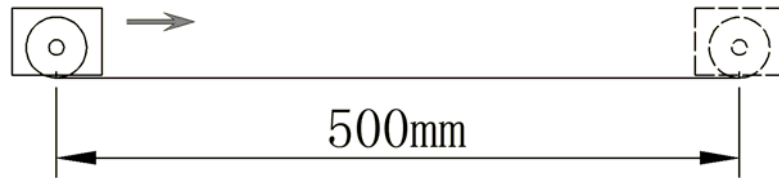


图 A4.4 编码器校准

## 附录 5 探头激励孔径和聚焦深度对 S-Scan 成像结果的影响

### A5.1

探头：5MHz 探头，阵元中心距 0.6mm，宽度 10mm；

楔块：55 度横波楔块

聚焦法则：激发 16/32 个晶片，40-70 度横波 S-Scan，聚焦深度 10mm 至 60mm.

人工反射体：长横孔，深度 20mm-55mm

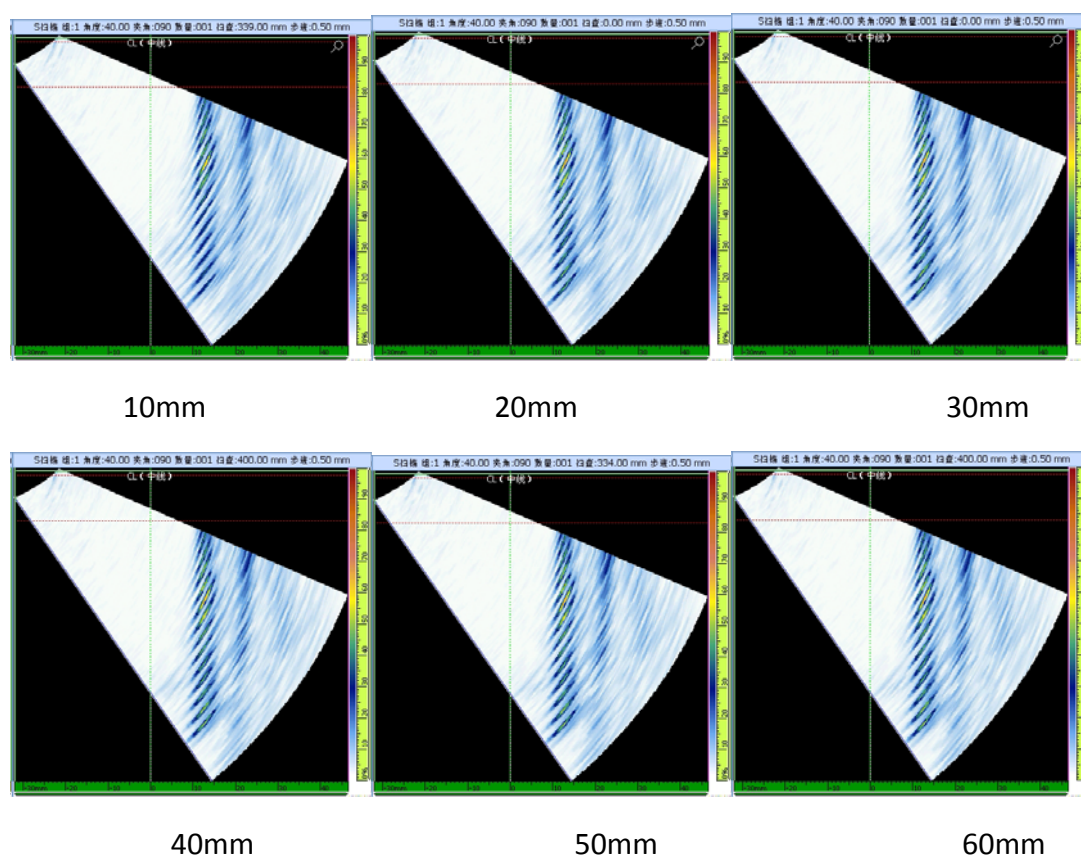
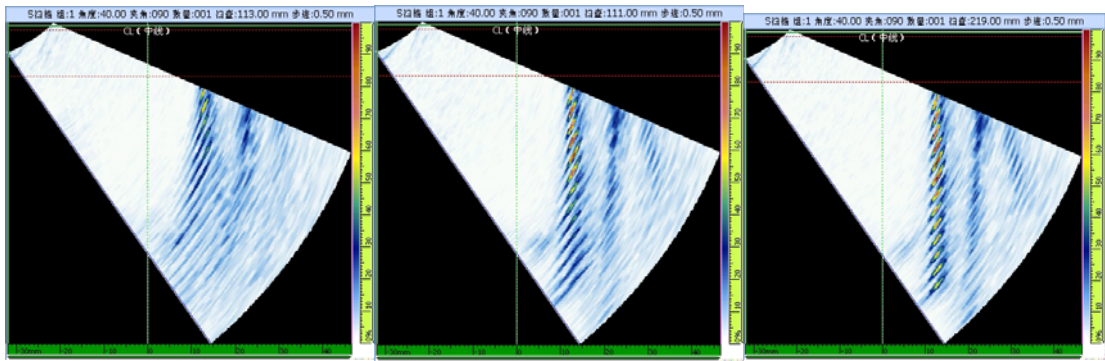


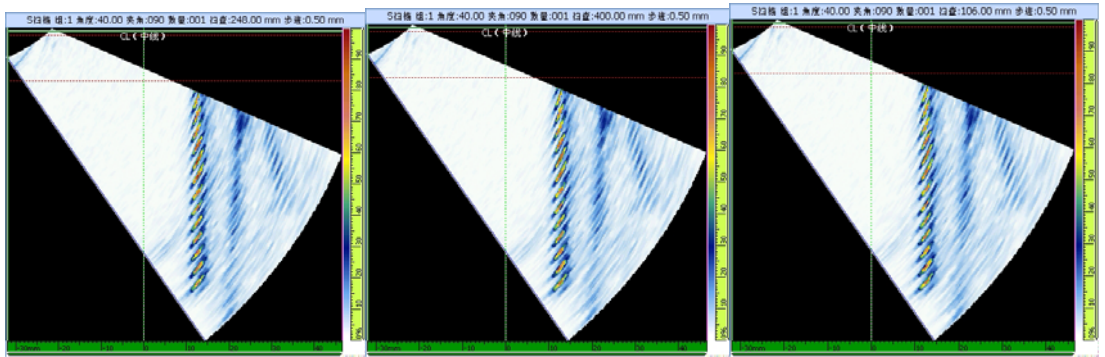
图 A5.1 激励 16 个晶片 S-Scan 聚焦成像结果



10mm

20mm

30mm



40mm

50mm

60mm

图 A5.2 激励 32 个晶片 S-Scan 聚焦成像结果

## A5.2

探头：5MHz 探头，阵元周期 0.6mm，宽度 10mm；

楔块：0 度延迟楔块

聚焦法则：激发 16/32 个晶片，0 度纵波 E-Scan，聚焦深度 10mm 至 60mm

人工反射体：长横孔，深度 20mm-55mm.

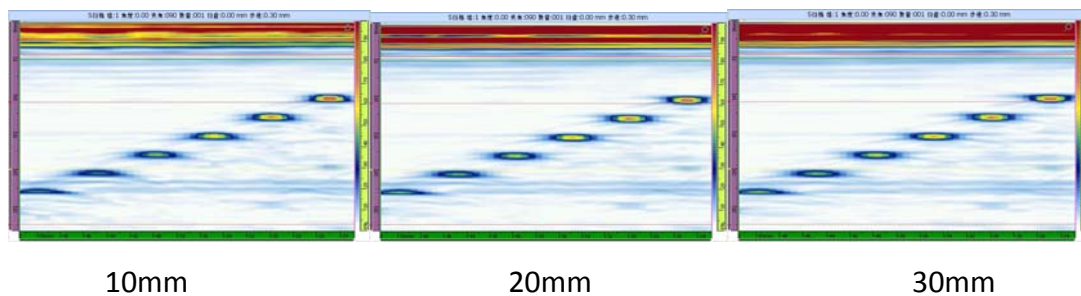


图 A5.3 激励 16 个晶片 E-Scan 聚焦成像结果

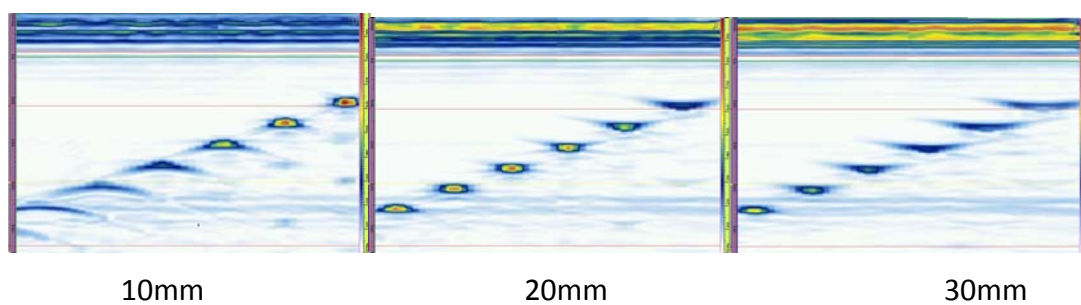


图 A5.4 激励 32 个晶片 E-Scan 聚焦成像结果

## 附录 6 典型缺陷图像

### A6.1 坡口未熔合

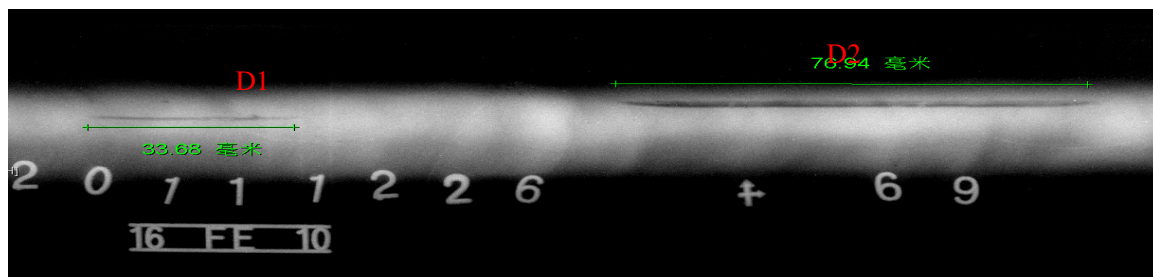


图 A6.1(a) 平板对接焊缝

(板厚 20mm, 单 V 坡口, 手工 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 余高宽度 33mm)

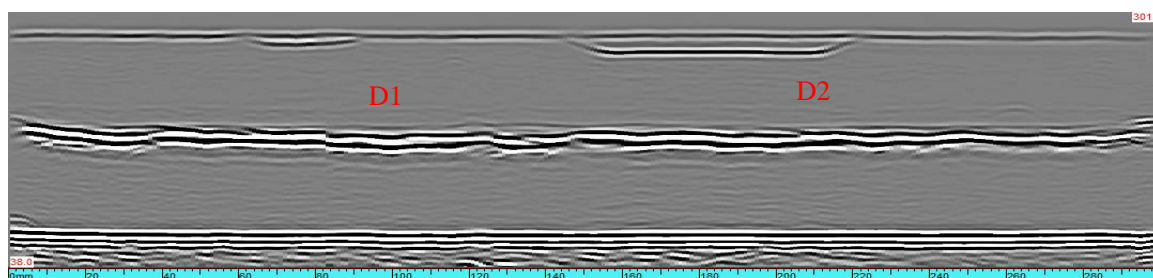


图 A6.1(b) TOFD 检测 B 扫描检测结果 (5MHz,  $\Phi 6$ mm 探头)

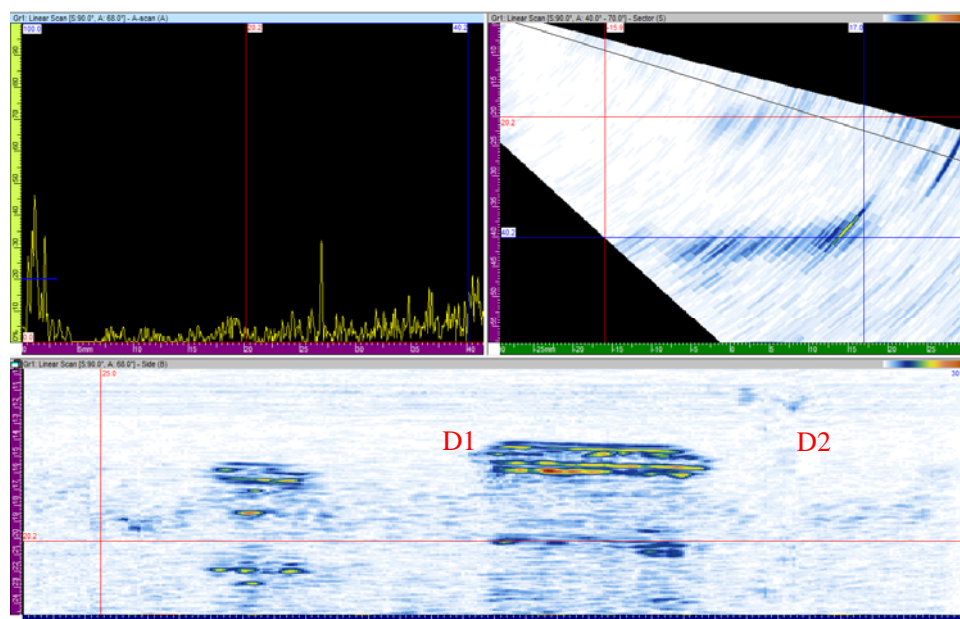


图 A6.1(c) 无缺陷位置 S-Scan 图像



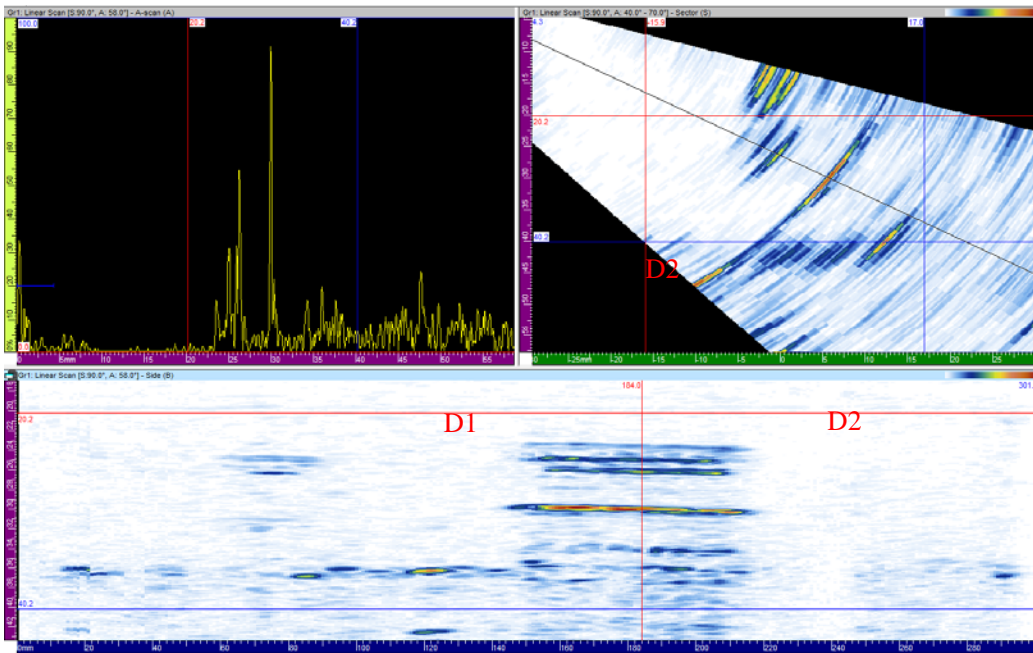
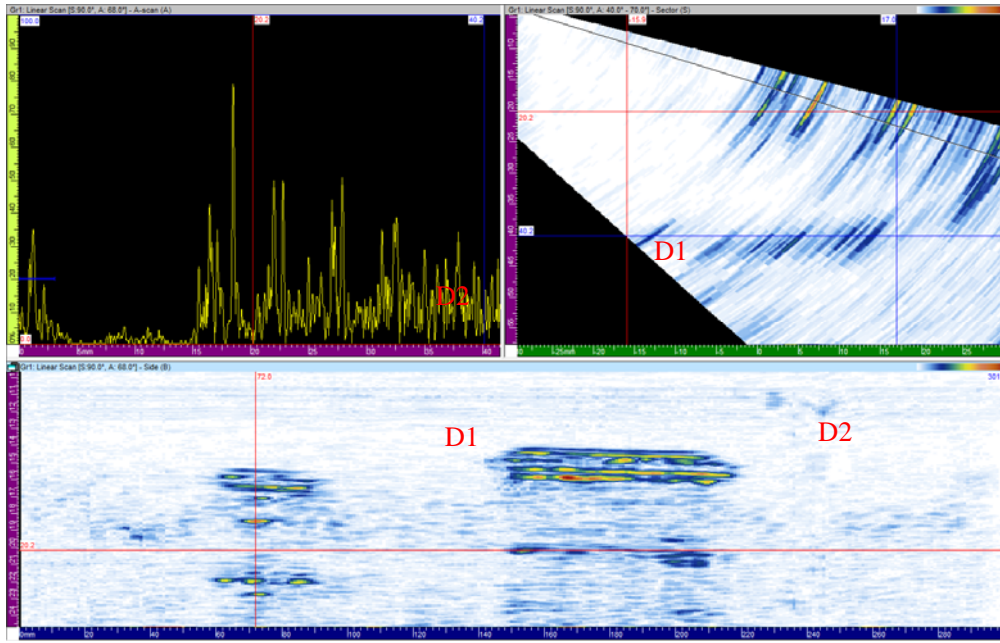


图 A6.1(d) PAUT 检测结果

(5MHz, 16 晶片探头, 0.6mm\*10mm, 55°横波楔块, S-Scan: 40°~70°)

## A6.2 条状夹渣

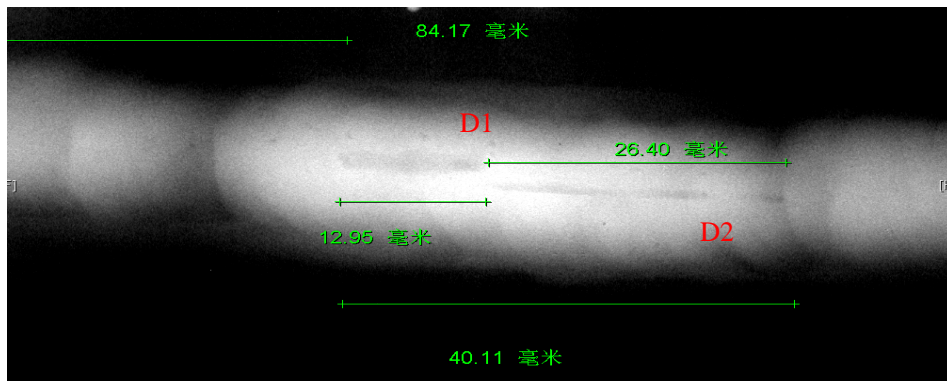


图 A6.2(a) 平板对接焊缝

(板厚 18mm, 单 V 坡口, 手工 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 余高宽度 35mm)

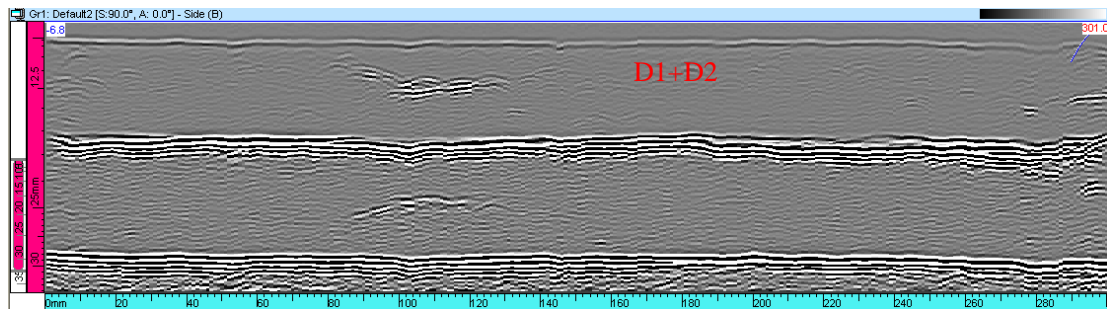


图 A6.2(b) TOFD 检测 B 扫描检测结果(10MHz,  $\Phi$ 3mm 探头)

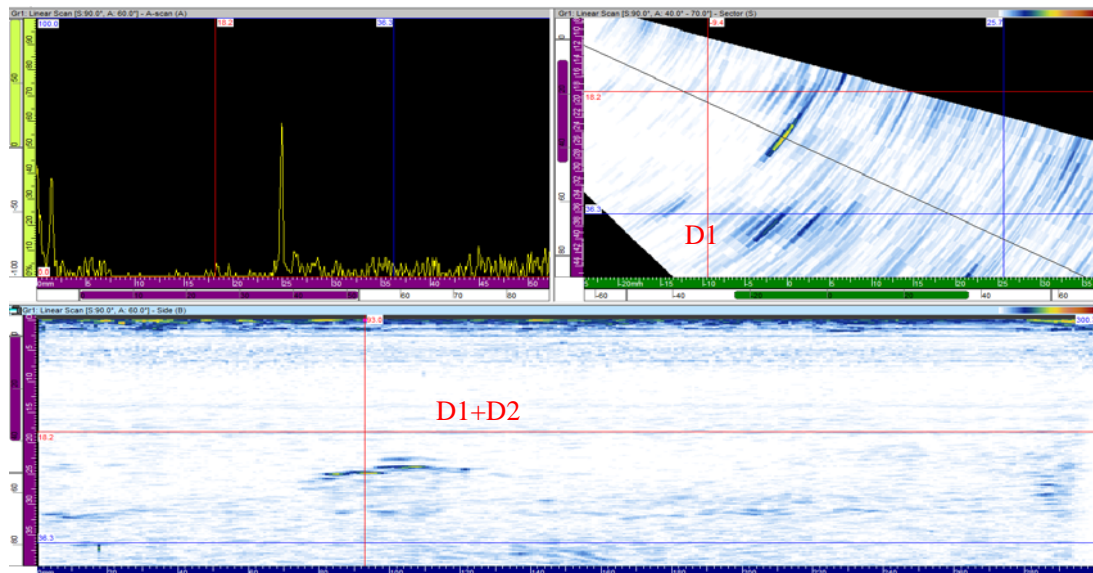


图 A6.2(c) PAUT 检测结果

(5MHz, 16 晶片探头, 0.6mm\*10mm, 55°横波楔块, S-Scan: 40°~70°)

### A6.3 气孔(单个气孔、密集气孔、分散气孔)

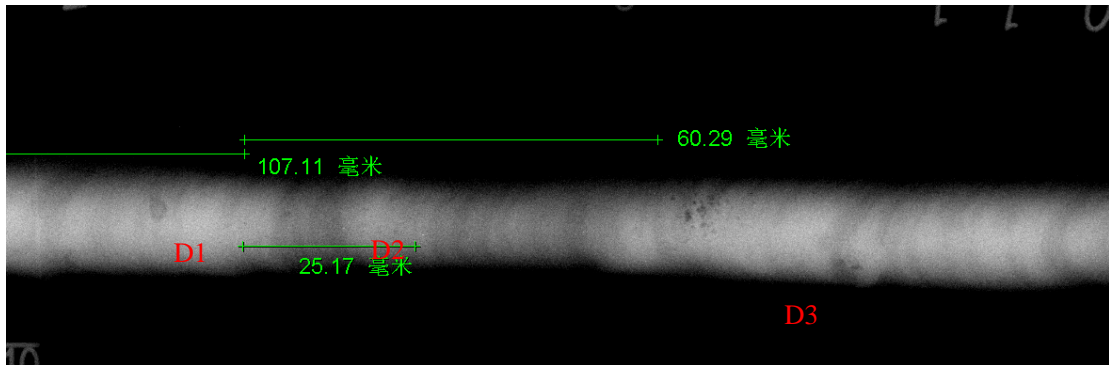


图 A6.3(a) 平板对接焊缝

(板厚 20mm, 单 V 坡口, 手工 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 余高宽度 35mm)

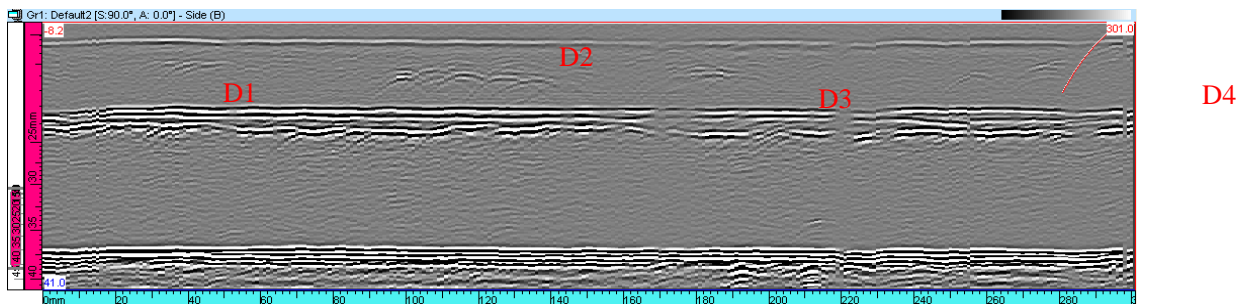
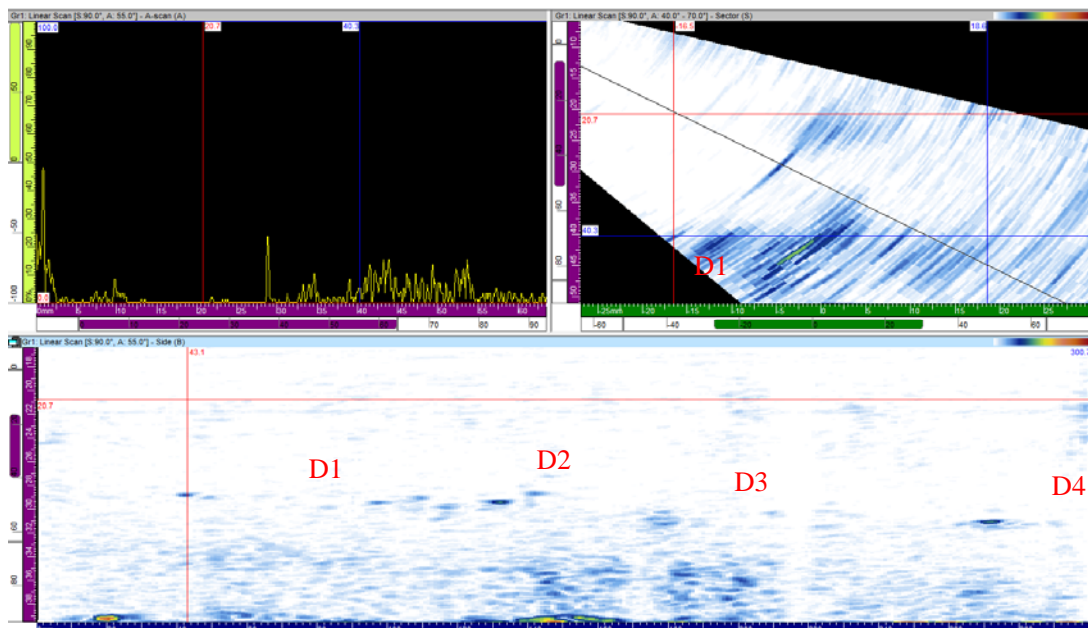
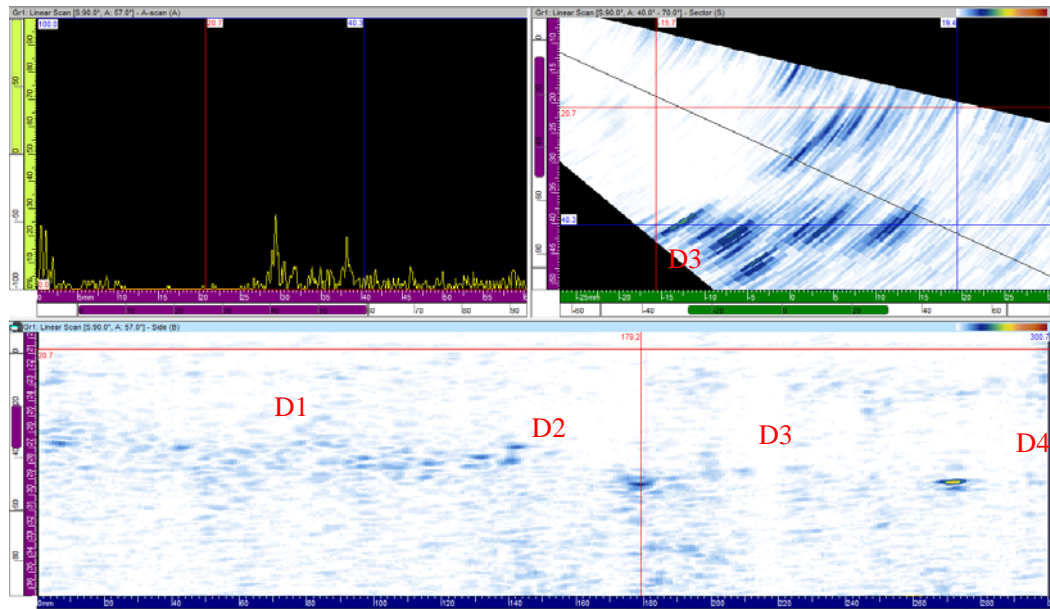
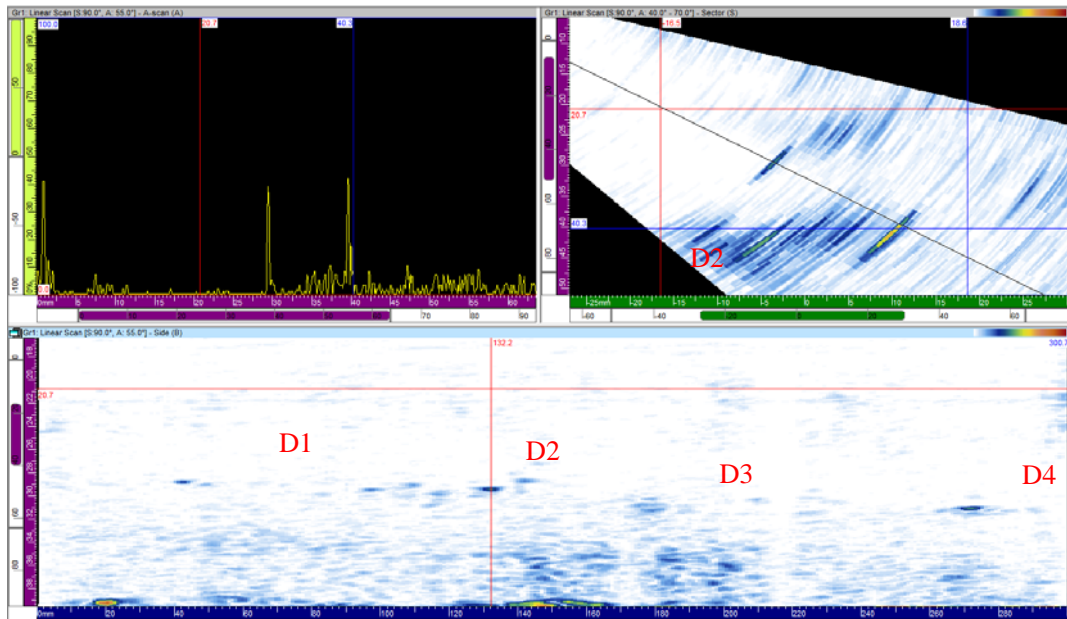


图 A6.3(b) TOFD 检测 B 扫描检测结果(10MHz,  $\Phi$ 3mm 探头)





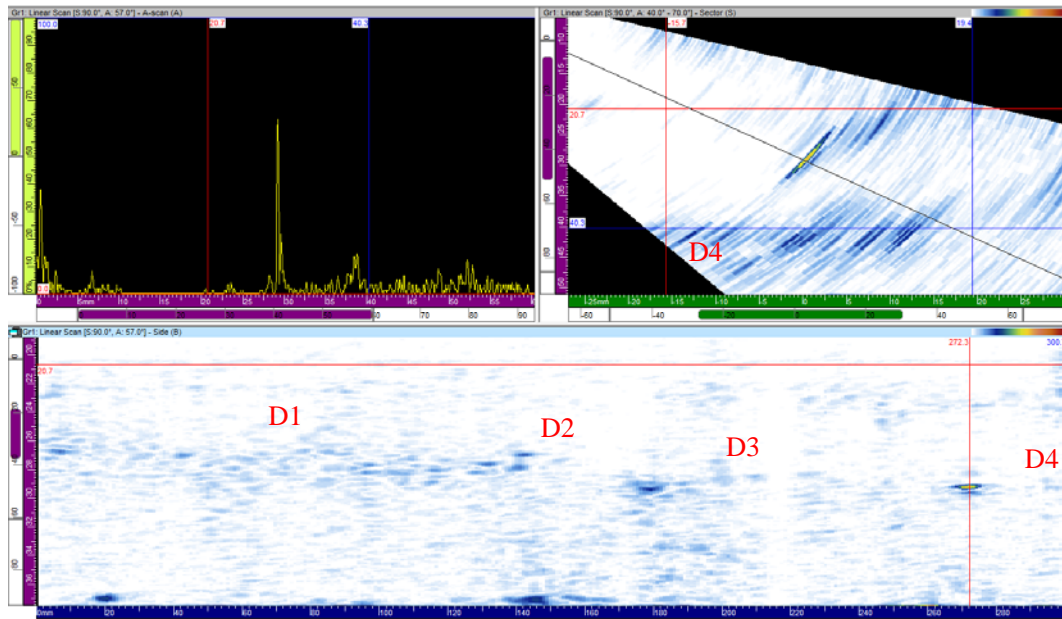


图 A6.3(c) PAUT 检测结果

(5MHz, 16 晶片探头, 0.6mm\*10mm, 55°横波楔块, S-Scan: 40°~70°)

## A6.4 密集气孔、未焊透

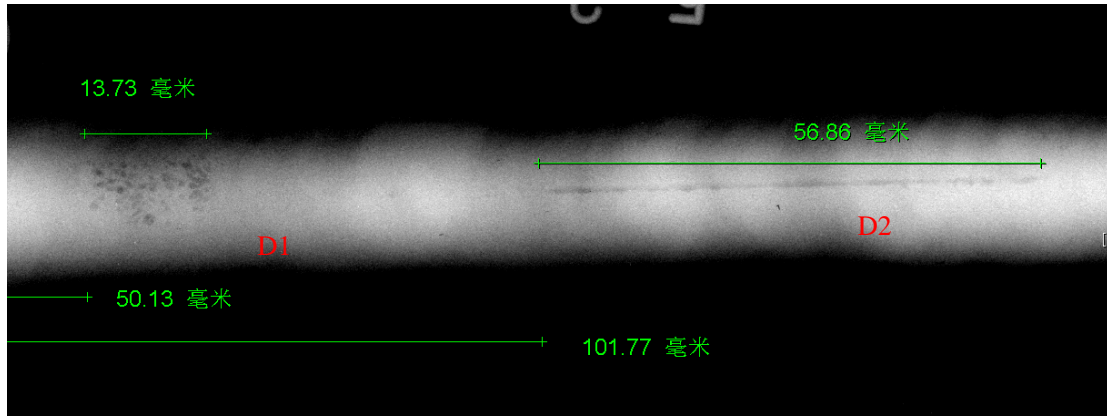


图 A6.4(a) 平板对接焊缝

(板厚 20mm, 单 V 坡口, 手工 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 余高宽度 30mm)

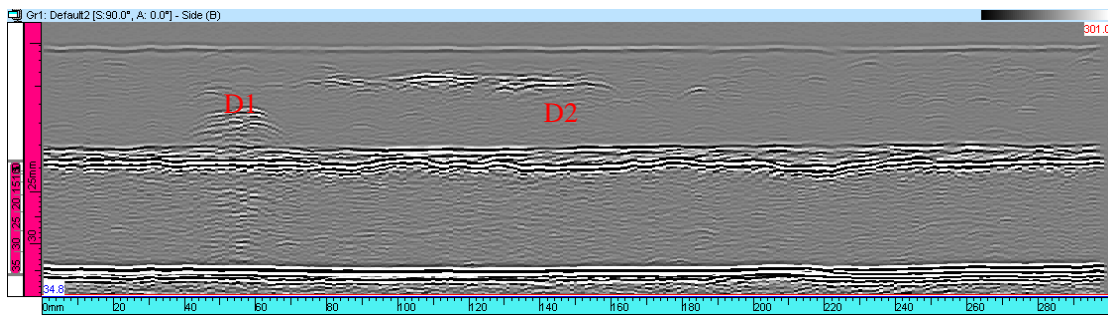


图 A6.4(b) TOFD 检测 B 扫描检测结果(10MHz,  $\Phi 3$ mm 探头)

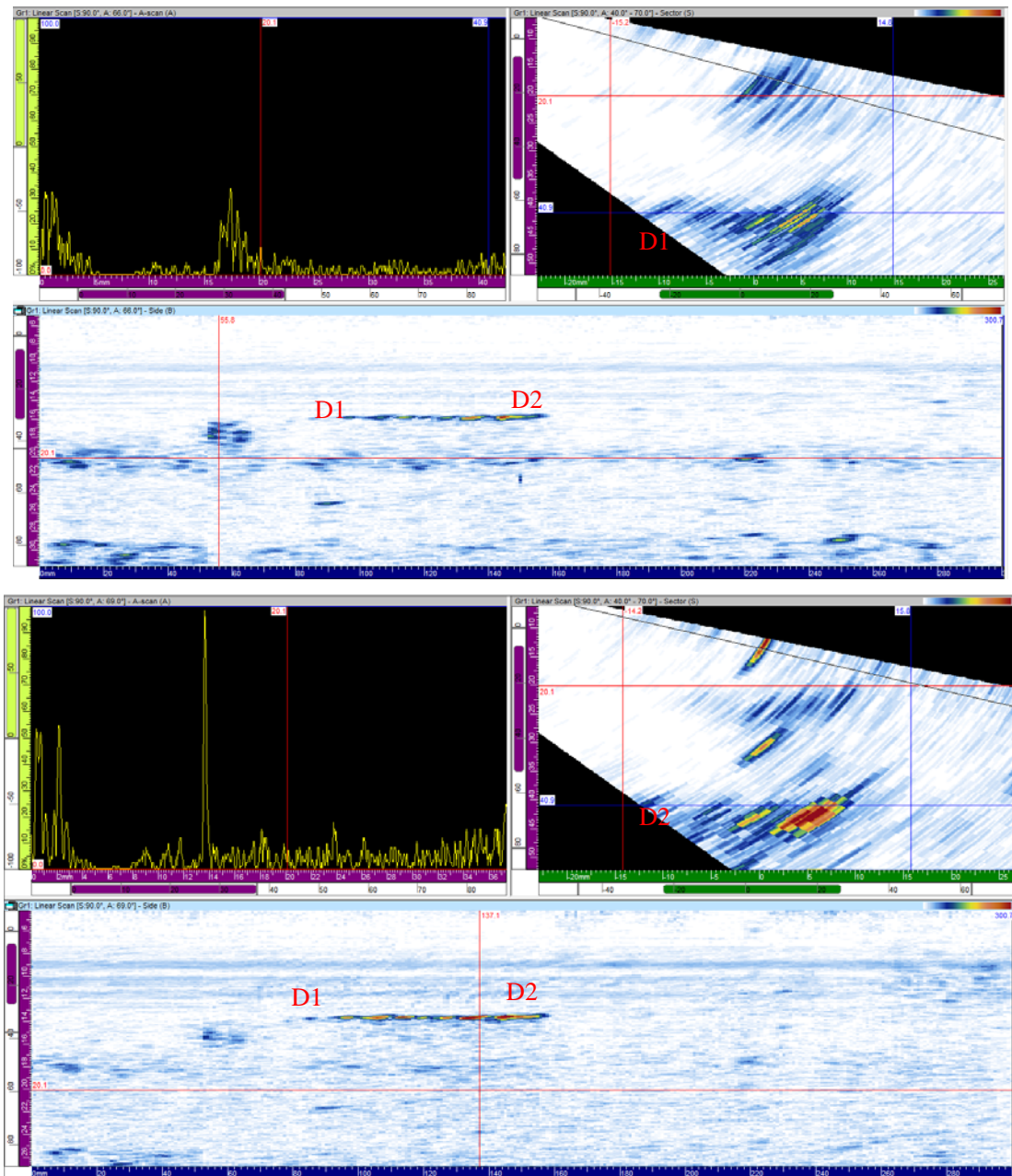


图 A6.4(c) PAUT 检测结果

(5MHz, 16 晶片探头, 0.6mm\*10mm, 55°横波楔块, S-Scan: 40°~70°)