

# 不等厚对接焊缝 TOFD 检测技术研究

关键词：不等厚对接；TOFD 检测；

摘要：TOFD 作为一种无损检测技术，以其检测可靠性高、测量缺陷高度精确、检测速度快、检测结果能成像等一系列优点，广泛的应用与压力容器等行业。但是现行的标准等只针对等厚对接焊缝检测做详细规定，对于现场检测中常见的不等厚对接焊缝的检测未做深入阐述，本文就此做一些研究。

## 1、TOFD 技术简介

TOFD 技术是一种无损检测新技术，其英文全称是 Time of Flight Diffraction Technique，中文译名为衍射时差法超声检测技术。TOFD 技术采用一发一收两个探头进行检测，探头相对于焊缝中心线对称布置。如图 1 所示，发射探头产生的大扩散角纵波波束入射到被检工件中，波束上缘在工件表面以下传播形成直通波，波束下缘打在工件底面形成纵波底面反射波，当工件中存在缺陷时，缺陷上下尖端会产生衍射信号，其到达时间比直通波晚，比纵波底面反射波早。根据接收探头收到的衍射信号的到达时间可以确定缺陷的位置，根据缺陷上下尖端信号时差可以测出缺陷高度。

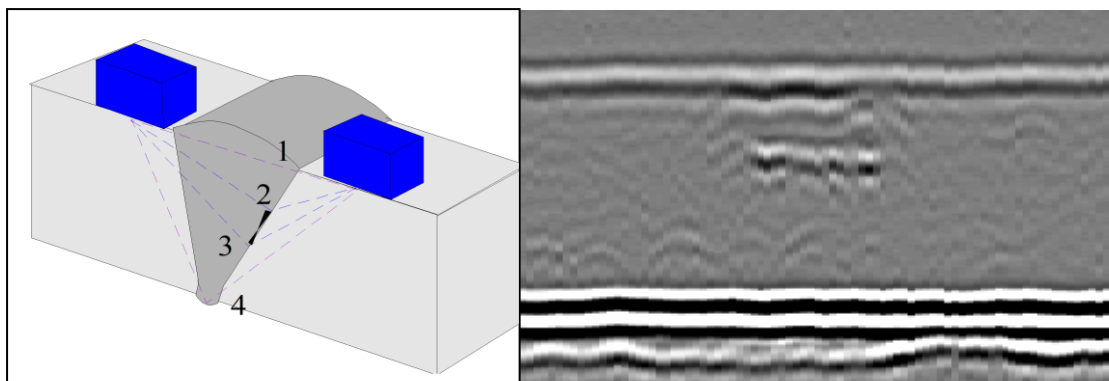


图 1：TOFD 检测示意图

TOFD 技术具有检测可靠性高、测量缺陷高度精确、检测速度快、检测结果能成像等一系列优点。与常规脉冲回波法超声检测技术相比，TOFD 技术具有以下优势：

- 1、检测可靠性好。由于衍射信号波幅基本不受声束角度影响，任何方向的

缺陷都能被发现，使该项技术具有很高的缺陷检出率。一般认为TOFD技术的缺陷检出率高达70—90%，远高于常规手工超声波检测技术，也高于射线照相技术。

2、定量精度高。采用衍射时差技术对缺陷高度的定量精度远远高于常规手工超声波检测。一般认为，对线性缺陷或面积型缺陷，TOFD测高误差小于1mm。对足够高的（一般是指大于3mm）裂纹和未熔合缺陷，高度测量误差通常只有零点几毫米。

3、检测速度快效率高，最常用的非平行扫查只需一人即可以操作，探头只需沿焊缝两侧移动即可完成扫查，不需做锯齿移动，不需要寻找最高波，检测效率远远高于常规手工超声波检测技术。

4、TOFD检测系统配有位置传感器，检测中能够确定缺陷与探头的相对位置，采集的信号通过处理可转换为图像。与常规超声仪器的A型信号波形显示相比，包含丰富信息的TOFD图像更有利于缺陷的识别和分析。

5、TOFD检测系统能全过程记录信号，长久保存数据，而且能高速进行大批量信号处理，完全克服了模拟超声探伤仪和简单数字超声探伤仪记录信号能力差无法提供全过程检测结果记录的缺点。

TOFD技术的发明和应用给超声无损检测领域带来一场革命，自2007年国家质检总局批准对承压设备焊缝检测允许使用TOFD技术代替射线技术以来，该项先进技术在中国迅速推广，产生了巨大的经济和社会效益。

虽然TOFD技术已经被认可并且得到推广，但实际应用中还有很多问题没有解决，不等厚焊缝的TOFD检测就是这些难题中的一个。本文通过理论分析，讨论了不等厚对接焊缝的特殊性及其对TOFD检测的影响，并通过试验工艺获得不等厚对接焊缝TOFD检测的优化工艺参数。

## 2、问题的提出

承压设备的大多数对接焊缝两侧板材是等厚的，这对于TOFD检测来说很合适，但也有一些不等厚削薄对接焊缝，例如容器筒体与球形封头的对接焊缝就是这种焊缝，其结构如图2所示。由于绝大多数容器设计把不齐平一侧放在容器外边，而TOFD检测从外面扫查比较方便，因此经常需要从不齐平那一侧进行扫查。这就带来一个问题，TOFD检测的工艺参数如何选择？

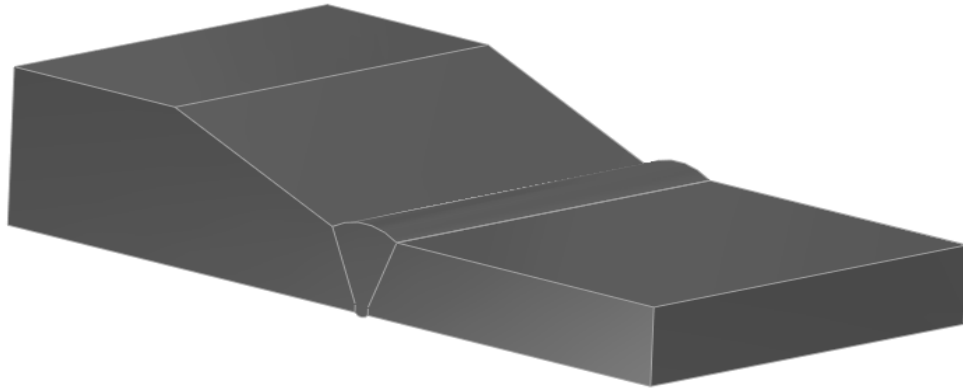


图 2：不等厚对接焊缝示意图

在国家能源局发布的 NB/T 47013.10-2010 标准中规定：“焊缝两侧母材厚度不同时，取薄侧厚度值”，并未提出不等厚焊缝检测工艺的具体要求。并且，标准的所有工艺内容都是针对等厚焊缝的，对不等厚焊缝从不平齐的一侧扫查并不适用。

按照标准规定：实施 TOFD 检测时，“对于每一组探头对的两个探头，其标称频率应相同，声束角度和晶片直径宜相同。”，非平行扫查时，“探头对称布置于焊缝中心线两侧”；初始扫查时，“探头对的声束交点位于其所覆盖区域的  $2/3$  深度处。”

上述规定都是针对等厚焊缝的，对不等厚焊缝检测中无法执行：如果选择角度相同的一组楔块，例如楔块角度  $\alpha$ ，因为焊缝一侧检测面存在角度  $\beta$ ，导致该侧实际的声束角度减小了  $\beta$ ，进而导致发射接收探头声束角度不一致，焦点下移和声场偏移等一系列问题（见图 3）。如果要保证声束交点处于  $2/3$  深度和保证声场均匀性，就不能采用相同楔块角度或将探头对称布置于焊缝两侧。

初步试验表明，对不等厚焊缝检测 TOFD 检测，如果随意选择工艺参数，会导致声场不均匀、盲区增大等一系列问题，由此可能引起缺陷的漏检，带来安全隐患。为找到适当的优化的工艺参数，需要开展研究和试验。

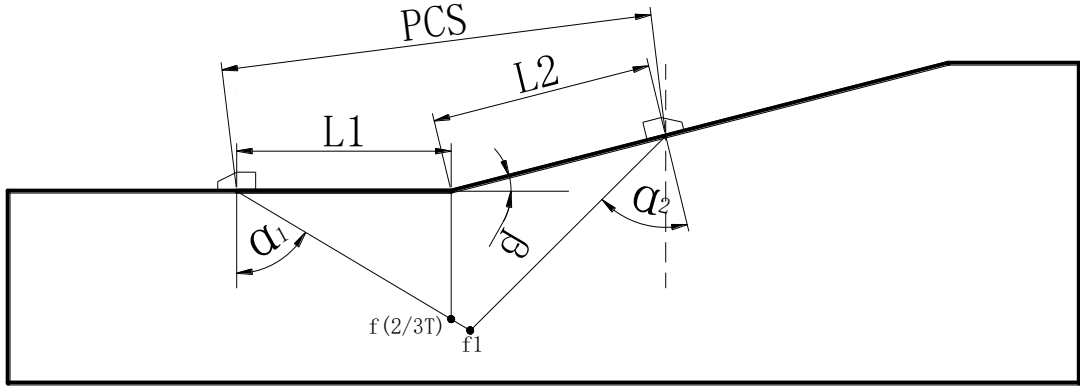


图 3: 检测面的角度  $\beta$  造成 TOFD 声束角度改变

## 2 实验准备

为开展不等厚焊缝 TOFD 检测试验，制作两组模拟试块，见图 4，具体规格尺寸如下表：

试块尺寸	30mm/50mm 对接试块	60mm/100mm 对接试块
厚边削薄比例	1:4	1:4
人工缺陷加工	① 上表面长 40×宽 2×高 4mm 槽 ② 10mm 深位置的 $\phi 2 \times 40$ 侧孔 ③ 20mm 深位置的 $\phi 2 \times 40$ 侧孔 ④ 下表面长 40×宽 2×高 2mm 槽	② 上表面长 40×宽 2×高 4mm 槽 ② 30mm 深位置的 $\phi 2 \times 40$ 侧孔 ③ 50mm 深位置的 $\phi 2 \times 40$ 侧孔 ④ 下表面长 40×宽 2×高 2mm 槽



图 4 模拟试块

### 3 工艺试验方案

为保证 TOFD 检测的声场均匀性，应满足焦点聚焦在检测厚度的  $2/3$  处，并要求焦点在焊缝水平位置的中间部位，这样得到的检测效果是最理想的。现在因工件的不等厚，由图 3 所示可知，要达到上述效果，有两种办法，一是减小  $L_2$  的长度，二是增大放置在较厚一侧工件上的楔块的角度，从而实现焦点的定位。

根据上述思想设计了以下的扫查工艺试验方案：

① 30/50mm 的模拟试块，焦点深度 20mm，焦点水平位置在人工缺陷的截面上。采用  $60^\circ - 60^\circ$ 、 $60^\circ - 70^\circ$ 、 $70^\circ - 70^\circ$  三种角度的楔块组合，确定各个组合的 PCS 等参数，并按此工艺进行试块扫查，分析扫查结果。

② 60/100mm 的模拟试块，根据厚度确定分区，第一分区 0-24mm，焦点深度 16mm；第二分区 24-60mm，焦点深度 48mm；且焦点水平位置均在人工缺陷的截面上。根据焦点深度，设计每个分区的采用的楔块组合，如下：第一分区： $60^\circ - 60^\circ$ 、 $60^\circ - 70^\circ$ 、 $70^\circ - 70^\circ$ ；第二分区： $55^\circ - 55^\circ$ 、 $55^\circ - 60^\circ$ 、 $60^\circ - 60^\circ$ ，并确定各个组合的 PCS 等参数，并按此工艺进行试块扫查，分析扫查结果。

### 4 试验数据分析

(1) 30/50mm 对接，焦点深度 20mm,不同楔块组合扫查图谱如下：

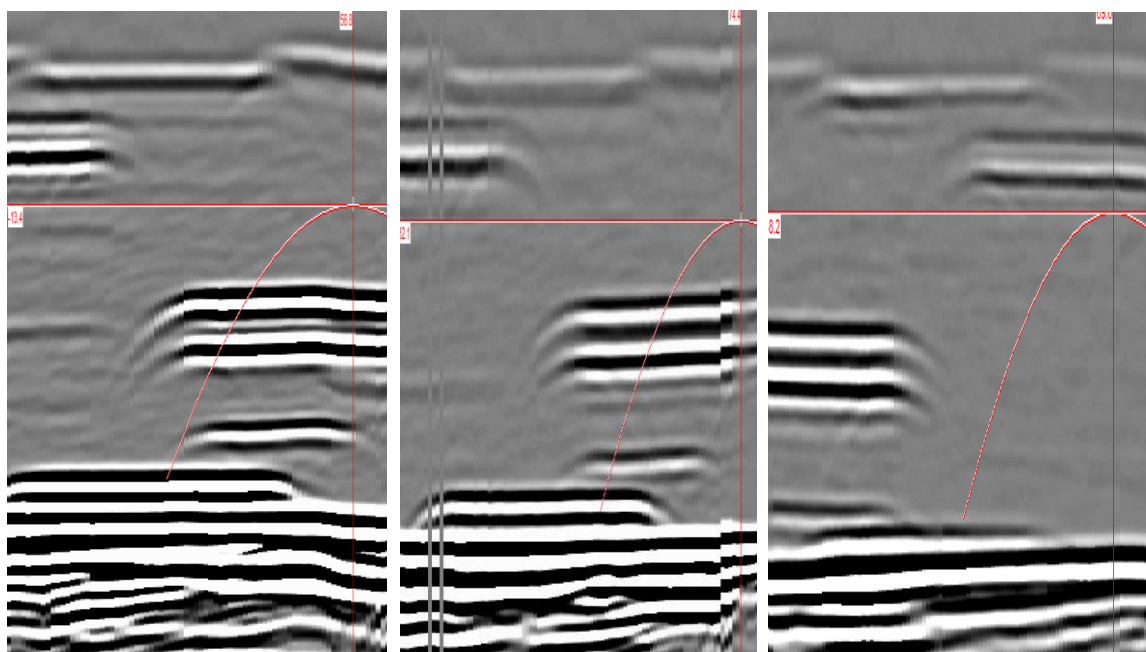


图 a:  $60^\circ - 60^\circ$

图 b:  $60^\circ - 70^\circ$

图 c:  $70^\circ - 70^\circ$

图谱数据分析如下：

	图 a	图 b	图 c
PCS	63mm	82mm	102mm
L1	35mm	35mm	55mm
L2	29mm	48mm	48mm
楔块角度( $\alpha 1-\alpha 2$ )	$60^\circ -60^\circ$	$60^\circ -70^\circ$	$70^\circ -70^\circ$
增益	88dB	88dB	88dB
直通波波幅	63.8%	31.5%	19.7%
上表面开口槽	清晰发现, 实测深度 6.0mm	能发现, 实测深度 6.4mm	能发现, 实测深度 6.8mm
10mm 深度位置孔	清晰发现, 实测深度 11.2mm	清晰发现, 实测深度 11.9mm	清晰发现, 实测深度 12.2mm
20mm 深度位置孔	清晰发现, 实测深度 22.4mm	清晰发现, 实测深度 23.1mm	清晰发现, 实测深度 23.7mm
下表面开口槽	清晰发现, 实测深度 30.8mm	清晰发现, 实测深度 31.7mm	能发现, 实测深度 32.1mm
厚度测量	32.4mm	33.4mm	33.6mm

注：PCS、L1、L2、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$  见图 3 所示。

(2) 60/100mm 对接，第一层，焦点深度 16mm,不同楔块组合扫查图谱如下：

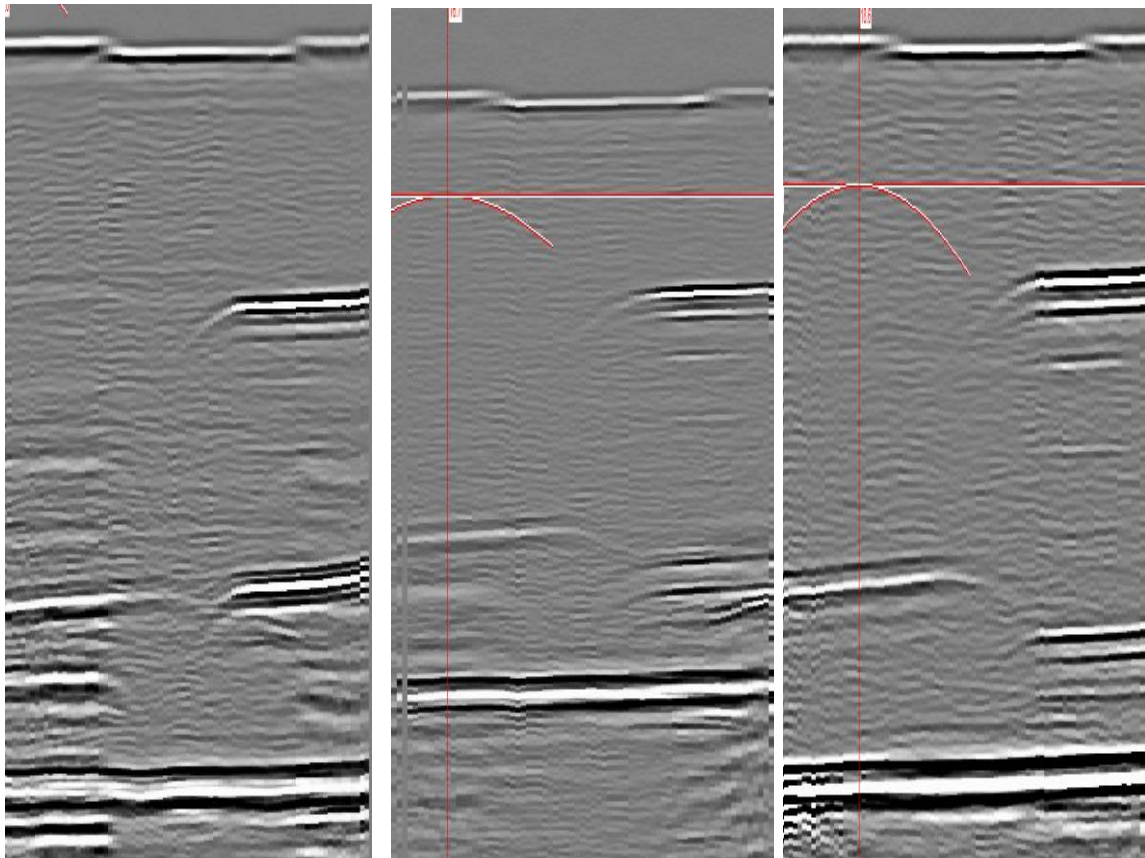


图 d:  $60^\circ -60^\circ$

图 e:  $60^\circ -70^\circ$

图 f:  $70^\circ -70^\circ$

图谱数据分析如下：

	图 d	图 e	图 f
PCS	50mm	66mm	82mm
L1	28mm	28mm	44mm
L2	23mm	39mm	39mm
楔块角度( $\alpha 1$ - $\alpha 2$ )	60° -60°	60° -70°	70° -70°
增益	88dB	88dB	88dB
直通波波幅	88.2%	52.8%	56.7%
上表面开口槽	清晰发现，实测深度 5.8mm	清晰发现，实测深度 6.1mm	清晰发现，实测深度 6.8mm
30mm 深度位置孔	清晰发现，实测深度 30.7mm	清晰发现，实测深度 31.1mm	清晰发现，实测深度 32.3mm
50mm 深度位置孔	能发现	能发现	能发现
下表面开口槽	不能发现（不属于检 测范围）	不能发现（不属于检 测范围）	不能发现（不属于检 测范围）

注：PCS、L1、L2、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$  见图 3 所示。

(3) 60/100mm 对接，第二层，焦点深度 48mm,不同楔块组合扫查图谱如下：

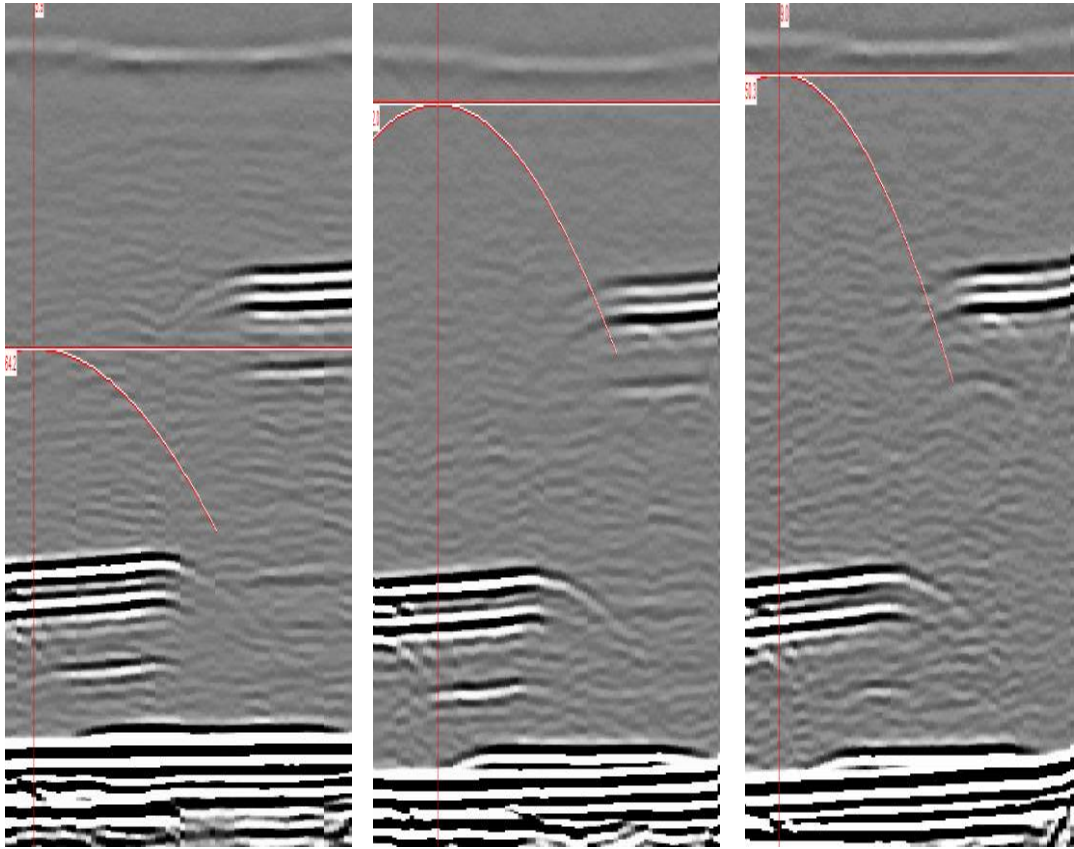


图 g: 55° -55°

图 h: 55° -60°

图 i: 60° -60

图谱数据分析如下：

	图 g	图 h	图 i
PCS	123mm	137mm	151mm
L1	69mm	69mm	83mm
L2	55mm	69mm	69mm
楔块角度( $\alpha 1-\alpha 2$ )	55° -55°	55° -60°	60° -60°
增益	97dB	97dB	97dB
直通波波幅	19.7%	21.3%	11.0%
上表面开口槽	基本不能发现（不属于检测范围）	基本不能发现（不属于检测范围）	基本不能发现（不属于检测范围）
30mm 深度位置孔	清晰发现	清晰发现	清晰发现
50mm 深度位置孔	清晰发现，实测深度 53.7mm	清晰发现，实测深度 54.6mm	清晰发现，实测深度 55.8mm
下表面开口槽	能发现，实测深度 63.2mm	能发现，实测深度 64.0mm	能发现，实测深度 65.1mm
厚度测量	64.0mm	65.2mm	66.0mm

注：PCS、L1、L2、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$  见图 2 所示。

## 4 结论

通过以上实验发现，对于不等厚对接焊缝的 TOFD 检测，通过采用不同角度的楔块组合以及调整 L1、L2 的长度（即偏置扫查），保证焦点聚焦在合适位置，对于试块中的缺陷均能很好的检出。但通过数据测量分析，发现随着 PCS 的增大，缺陷深度以及工件厚度的测量偏差随之增大，如实验中 30mm 厚的工件在 PCS 为 102mm（最大值）时测量值为 33.6mm，60mm 厚的工件在 PCS 为 151mm（最大值）时测量值为 66.0mm，厚度误差  $\geq 10\%$ ，该值远大于 NB/T 47013.10.2010 标准规定的“深度校准应保证深度测量误差不大于工件厚度的 1%或 0.5mm(取较大值)”，所以采用本文所述方法进行不等厚对接焊缝 TOFD 检测时，缺陷的定位会出现较大的偏差。对于这种情况我们在实际检测中可以采用以下方法进行解决：一是通过模拟试块，测量出误差大小，再对实际检测的结果进行补偿；二是发现缺陷存在时，通过 A 型脉冲反射超声进行测量，从而实现缺陷的准确定位。