



# 中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—××××

---

杭州天工无损检测设备有限公司 [www.tgjc.com.cn](http://www.tgjc.com.cn)  
057188061098 参考学习用，请勿做商业用途

## 无损检测 超声检测 超声衍射声时技术 检测和评价方法

Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Time-of-flight diffraction  
technique as a method for detection and sizing of discontinuities

(送审稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

## 目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 定义与符号.....	2
4 概述.....	3
4.1 技术原理.....	3
4.2 表面条件和耦合要求.....	3
4.3 材料和加工类型.....	4
5 人员资格.....	5
6 设备要求.....	6
6.1 超声设备和显示.....	6
6.2 超声探头.....	6
6.3 扫查装置.....	6
7 设备设置规程.....	6
7.1 概述.....	6
7.2 探头选择与探头间隔.....	7
7.3 时窗设置.....	7
7.4 灵敏度设置.....	7
7.5 扫查分辨力设置.....	8
7.6 扫查速度设置.....	8
7.7 系统性能检查.....	8
8 数据解释与分析.....	8
8.1 不连续的基本分析.....	8
8.2 不连续的详细分析.....	9
9 复杂几何形状的检测和定量.....	10
10 技术的局限性.....	10
10.1 精度和分辨力.....	11
10.2 盲区.....	12
11 无数据记录的 TOFD 检测.....	12
12 检测工艺规程.....	12
13 检测报告.....	12
附录 A（规范性附录） 参考试块.....	14

## 前 言

本标准修改采用ENV 583-6:2000《Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Part 6 : Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities》(英文版)。

本标准根据ENV 583-6:2000重新起草。

考虑到我国国情,在采用ENV 583-6:2000时,本标准做了一些修改。有关技术性差异如下:

- a) 将规范性引用文件 EN 473 改为 GB/T 9445;
- b) 将规范性引用文件 EN 583-1 改为 GB/T 5616;
- c) 将规范性引用文件 EN 583-1 中的部分引用内容直接翻译(见第4章和第13章);
- d) 将规范性引用文件 EN 583-2 中的引用内容直接翻译(见表1);
- e) 将规范性引用文件 EN12668-1、EN12668-2 和 EN12668-3 改为 GB/T 18694 和 JB/T 9214。

为便于使用,本标准还做了下列编辑性修改:

- a) “本欧盟暂行标准”一词改为“本标准”;
- b) 删除欧洲标准的前言;
- c) 部分条款的编号格式按 GB/T 1.1—2000 规定做修改。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:硕德(北京)科技有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、北京时代之峰科技有限公司、常州超声电子有限公司、山东济宁模具厂、上海苏州美柯达探伤器材有限公司、上海材料研究所。

本标准主要起草人:香勇、强天鹏、彭雪莲、彭波、潘振新、魏忠瑞、金宇飞。

本标准为首次制定。

# 无损检测 超声检测 超声衍射声时技术检测和评价方法

## 1 范围

本标准规定了超声衍射声时技术的方法总则。

本标准适用于低合金碳钢制件中不连续的检测和定量。本标准也适用于其它类型材料，前提是使用衍射声时技术时要充分考虑材料的几何和声学特性以及检测的灵敏度。

本标准适用于材料中的不连续检测和GB/T 5616中所包含的应用，也包括其中提到的焊缝。选择此方法的原因在于其明确的超声探头位置和扫查方向。

除非在参考文件中另有说明，否则本标准是可适用的最低要求。



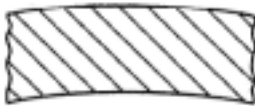

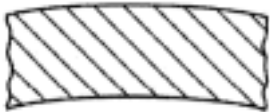

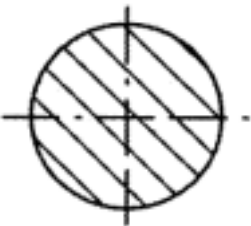

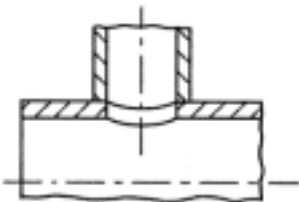
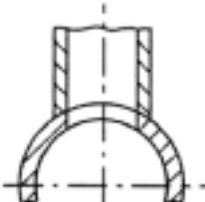
除非有明确声明，否则本标准适用于表1中规定的产品等级。

——1级，没有限制；

——2级和3级，有关限制见第9章；

——4级和5级，产品的检查将要求有特殊过程。第9章中同样有说明。

表1 产品等级

等级	特征	x方向截面	y方向截面
1	具有两个平行表面（如：盘和片）		
2	具有平行、共轴曲面（如：管）		
3	具有多个平行曲面（如：凹状末端）		
4	横截面是实心圆（如：棒和饼）		
5	复杂形状（如：管口、管座）		

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注明日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 5616 无损检测 应用导则  
 GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证  
 GB/T 18694 无损检测 超声检测 探头及其声场的表征  
 JB/T 9214 A型脉冲反射式超声波探伤系统工作性能 测试方法

### 3 定义与符号

——TOFD 衍射声时技术

$x$  平行于扫查面和预定义参考线的坐标。这条参考线应与焊缝相一致。坐标轴的起点可定义为与检查工件相一致（见图1）；

$\Delta x$  缺欠长度；

$y$  平行于扫查面，垂直于预定义的参考线的坐标（见图1）；

$\delta y$  侧向位置误差；

$z$  垂直于扫查面的坐标（见图1）；

$\Delta z$  缺欠高度；

$d$  缺欠顶端距扫查面的深度；

$\delta d$  深度误差；

$D_{ds}$  扫查面盲区；

$D_{dw}$  背面盲区；

$c$  声速；

$\delta c$  声速误差；

$R$  空间分辨力；

$t$  从发射到接收的渡越时间；

$\Delta t$  侧向波与第二个超声信号间的渡越时间差；

$\delta t$  渡越时间误差；

$t_d$  在深度 $d$ 的渡越时间；

$t_p$  最大幅值的10%对应的声脉冲长度（时间）；

$t_w$  背面回波的渡越时间；

$S$  两探头入射点间距离的一半；

$\delta S$  探头间距一半的误差；

$W$  壁厚；

盲区 由于声源信号干涉，指示可能模糊的区域；

背面盲区 由于背面回波的存在，信号可能模糊的另一盲区；

A扫描显示 超声信号幅度与时间函数关系的显示；

B扫描显示 超声信号的渡越时间与探头位置函数关系的显示；

非平行扫查 垂直于声束方向的扫查（见图4）；

平行扫查 平行于声束方向的扫查（见图5）。

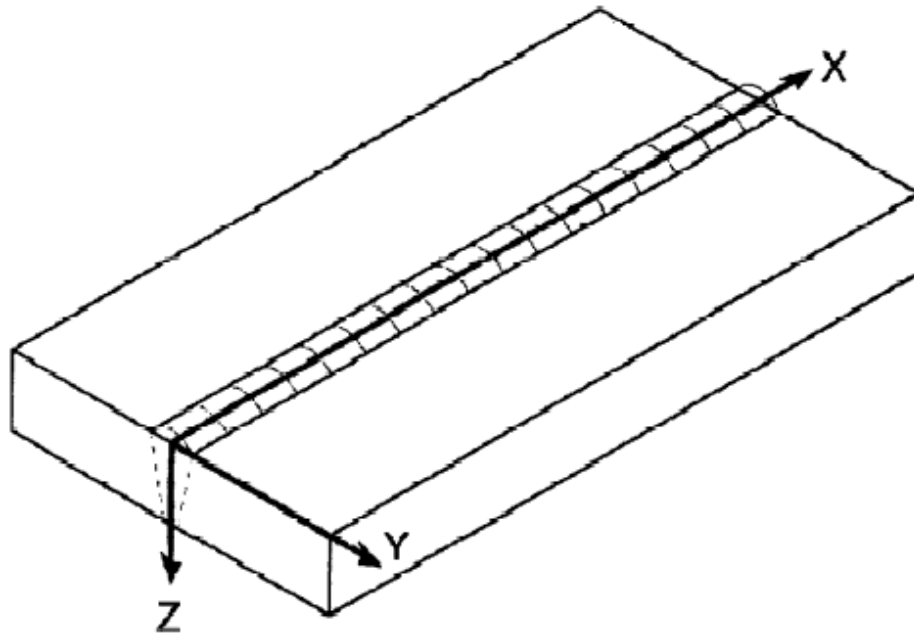


图1 坐标定义

## 4 概述

### 4.1 技术原理

TOFD技术依赖于超声波与不连续端点的相互作用。这种相互作用导致产生一个覆盖大角度范围的衍射波，对衍射波的探测可用于确定缺欠的存在。所记录的信号渡越时间可测量缺欠的高度，从而能够对缺欠定量。缺欠尺寸往往由衍射信号的渡越时间决定。信号幅度不用于缺欠定量评估。

TOFD技术的基本组成包括一对相距一定间距的超声发射器与接收器（见图2）。由于超声波的衍射与缺欠取向无关，因此通常使用宽角度声束的纵波探头。这样就可一次扫查完成对一定空间的检查。然而，单次扫查中可检查的空间的大小是有限制的（见7.2）。

一个声脉冲发射后，第一个到达接收器的信号通常是侧向波，这个侧向波刚好从测试试件近表面传播。

当不存在不连续时，第二个到达接收器的信号叫做背面回波。

这两个信号通常被作为参考，如果波型转换忽略不计，由材料中的不连续所产生的任何信号将在侧向波与背面回波之间到达，因为侧向波和背面回波分别对应发射器与接收器之间最短和最长的路径。同理，缺欠上端所产生的信号较缺欠下端所产生的信号先到达接收器。典型示意（A型显示）如图3所示。缺欠高度可从两个衍射信号的渡越时间差中推算出来（见8.1.5）。注意侧向波和背面回波以及缺欠上下端回波之间的相位翻转。

缺欠可能接近试件的上下表面或分布于整个试件的厚度内，通过扫查两个表面将提高整体精确性，尤其对于近表面的伤。

### 4.2 表面条件和耦合要求

所有扫查面应清除污物、氧化皮、焊渣等，并保证平整光滑以便超声耦合。另外，在检测前应消除工件表面状况可能造成的解释误差。

由于衍射信号本身比较弱，恶劣的表面条件导致的信号质量进一步下降，这将严重影响检测的可靠性。

可使用不同的耦合介质，但是它们的类型应适合被检材料。例如：水、含添加剂的水（润湿剂、防冻剂、防腐剂）、连结剂、油、脂、含水的纤维素糊等等。

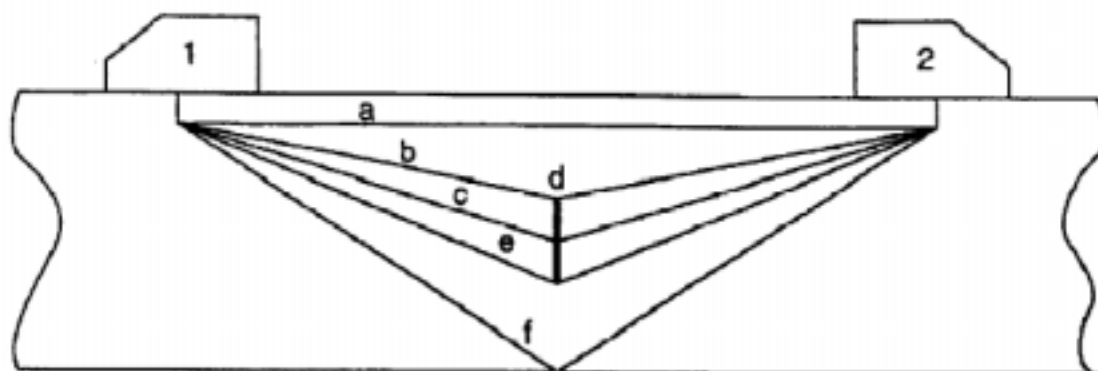
耦合介质的特性在整个检查过程中应保持稳定并满足使用温度范围。

#### 4.3 材料和加工类型

由于TOFD技术中使用的信号幅度相对偏低，所以这种方法一般适用于对超声波衰减和散射影响相对较小的材料。通常，可适用于非合金和低合金碳钢制件和焊缝中，也可用于细晶奥氏体钢和铝中。

对于粗晶材料和有明显各向异性的材料，例如：铸铁，奥氏体焊接材料和高镍合金，需要进一步的有效性确认和数据处理。

通过双方协定，典型的具有人工和（或）自然不连续的试件可用于确定此技术的检测能力。注意人工缺欠和真实缺欠的衍射特征会明显不同。



1——发射器；2——接收器。

a——侧向波；b——上端；c——内角；d——缺欠；e——下端；f——背面回波。

图2 TOFD 的基本结构



X——幅度；Y——时间。

a——侧向波；b——上端；c——下端；d——背面回波。

图3 内部缺欠的 A 型显示示意图

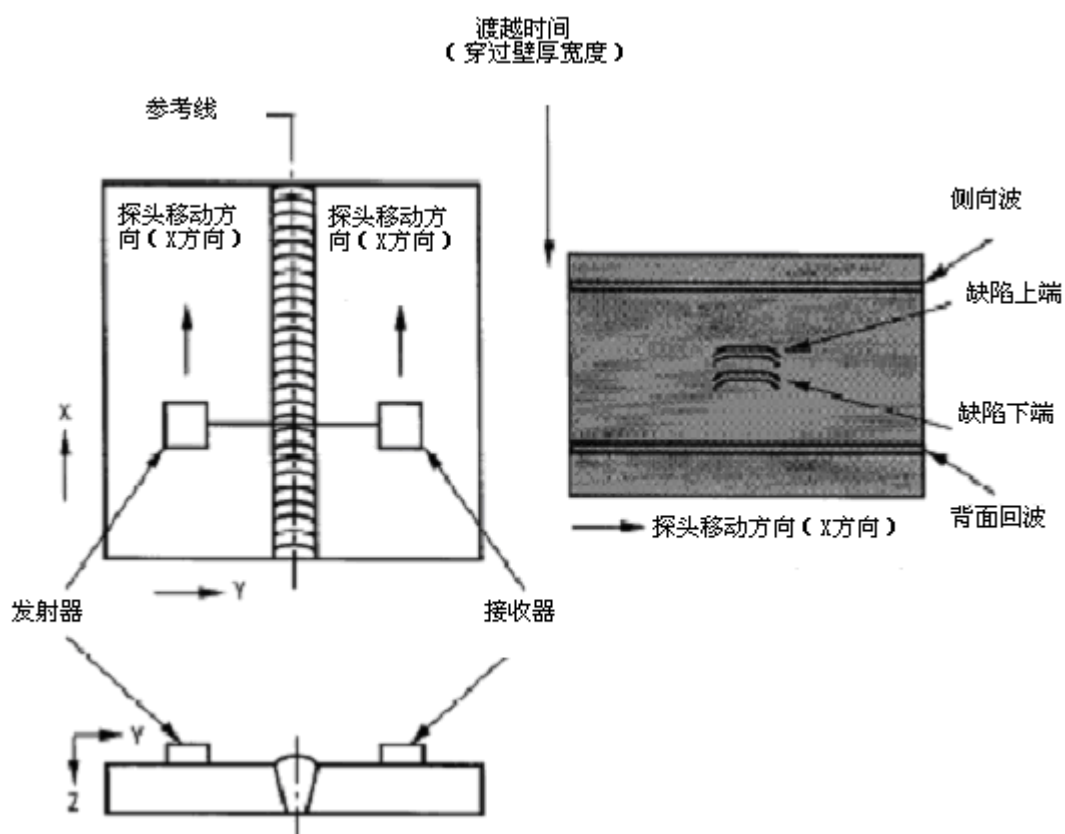


图4 非平行扫查，左图是探头移动的典型方向，右图是相应的 B 型显示

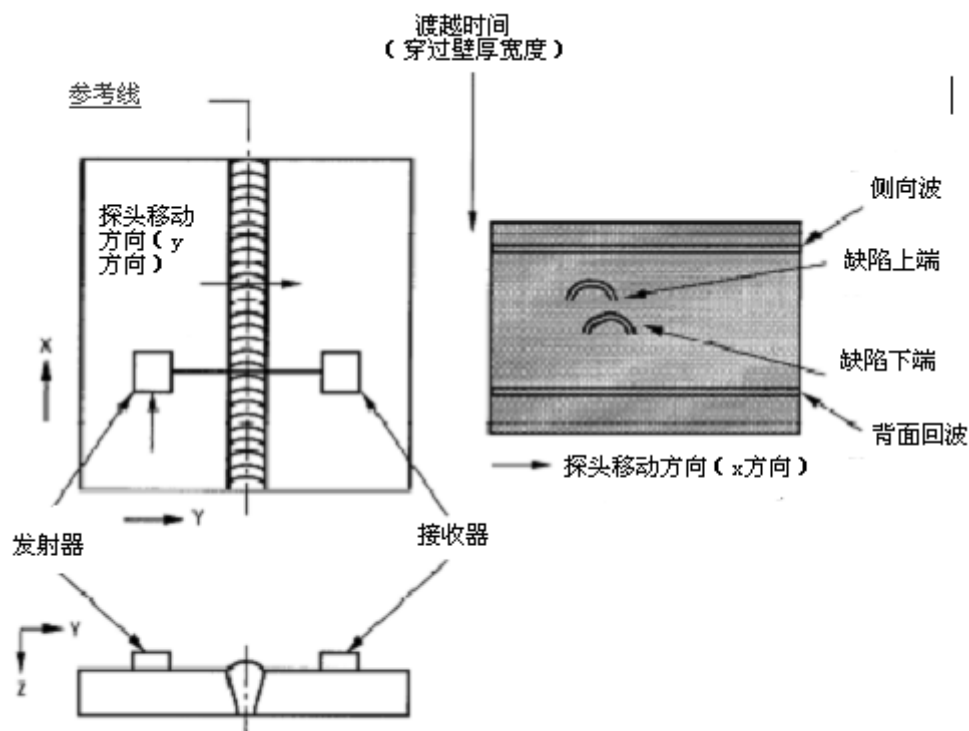


图5 平行扫查，左图是探头移动的典型方向，右图是相应的 B 型显示

5 人员资格



从事TOFD检测的人员应至少符合GB/T 9445的要求，并接受TOFD技术用于产品等级检测的培训和考核，培训和考试应按指定的书面实施细则进行。

## 6 设备要求

### 6.1 超声设备和显示

用于TOFD技术的超声设备，应至少符合GB/T 18694、JB/T 9214中的要求。

此外，还应满足如下要求：

——接收器带宽应至少在探头标称频率 - 6dB带宽的0.5 ~ 2倍范围内，除非特殊材料和产品等级要求更大带宽，可使用相适应的带通滤波器；

——发射脉冲可是单极性或双极性，脉冲上升时间不应超出标称探头频率对应周期的0.25倍；

——应以至少标称探头频率4倍的采样率对未检波信号进行数字化；

——对于常规应用，超声设备和扫查机构（见6.3）组合后的信号获取和数字化速度，应满足1mm至少一次A型扫描。数据获取和扫查机构运动应同步；

——选择时基线的合适部分对其中的A型扫描进行数字化，并提供一个位置和长度可编程的窗口。窗口的起点应在距发射脉冲0 ~ 200 $\mu$ s间可编程，长度应在距发射脉冲5 ~ 100 $\mu$ s间可编程。这样就可选择合适的信号（如4.1中描述的侧向波或爬波、背面回波信号、一个或多个波型转换信号，）数字化和显示；

——数字化的A型扫描线应以与幅度相对应的灰度或单色阶显示，邻近相连就形成一个B型显示。

图4和图5分别为非平行和平行扫查的典型B型显示。灰度或单色的色级应至少64级；

——为了存档，设备应能将所有A型扫描或B型扫描（视情况而定）存储在磁性或光性储存媒介中（例如硬盘、软盘、磁带或光盘）。为输出报告，设备应能对A型扫描或B型扫描（视情况而定）进行硬拷贝；

——设备应具备信号均值处理的能力。

获得典型TOFD信号需要的较高的增益设置，因此可能用到前置放大器，该放大器在所关注的频率范围内应具有平坦的频率响应，并且放置在尽可能靠近接收探头的位置。

对不连续进行基本和高级分析所需的附加要求见第8章。

### 6.2 超声探头

用于TOFD 技术的超声探头应至少符合下列要求：

——探头数量：2（发射器和接收器）；

——类型：任意合适的探头（见7.2）；

——波型模式：通常用纵波；横波探头的使用比较复杂，但特殊情况下也可商定使用；

——两个探头应有相同的中心频率，允许频差 $\pm 20\%$ ；频率：详细情况见7.2探头频率的选择；

——侧向波与背面回波的脉冲长度不应超过两个周期，以峰值的10%测量；

——脉冲重复频率应保证连续发射脉冲的声信号间无干扰产生。

### 6.3 扫查装置

扫查装置用于保持两探头入射点间距离不变并平行排列。

扫查装置的另一个功能是为超声设备提供探头位置信息，以生成与位置有关的B型显示。探头位置信息可通过例如增量型磁或光学编码器、电位计获得。

TOFD应用中的扫查装置可马达或手动驱动，扫查装置应具有一个合适的导向装置（钢鼓、钢带、自动跟踪系统、导向轮等）。

参考线（例如：焊缝的中心线）中心的导向精度应保持在是探头间距  $\pm 10\%$ 的公差范围内。

## 7 设备设置规程

### 7.1 概述

探头选择和探头配置是重要的设备设置参数，它们在很大程度上决定着TOFD技术的整体精度、信噪比和所关注的覆盖区域。

设置规程的目的是为了确保：

- 足够的系统增益和信噪比，以便发现所关注的衍射信号；
- 可接受的分辨力和对所关注区域的足够覆盖；
- 系统动态范围的有效使用。

## 7.2 探头选择与探头间隔

### 7.2.1 探头选择

本条规定了TOFD技术中典型探头布置，以便对薄和厚工件都能很好的检测。注意：这些布置不是强制的，为满足某一规范而提出的具体要求应检查。

对于 70mm厚的钢，可使用一对探头。其中对于50 ~ <70mm厚的钢，需要在同时具有足够分辨力和覆盖区域的前提下可使用一对探头。表2对4个不同壁厚范围，列出了推荐的探头选择参数，以获得足够的分辨力和覆盖区域。

表2 对于 70mm 厚钢的探头选择推荐参数

壁厚 mm	中心频率 MHz	晶片大小 mm	标称探头角度
<10	10 ~ 15	2 ~ 6	50° ~ 70°
10 ~ <30	5 ~ 10	2 ~ 6	50° ~ 60°
30 ~ <50	2 ~ 5	6 ~ 12	45° ~ 60°
50 ~ <70	2 ~ 5	6 ~ 12	45° ~ 60°

对于厚度大于70mm的钢，壁厚应被分为若干检查区，每个区覆盖一个不同的深度区域，表3列出了推荐的中心频率，晶片大小和标称探头角度，以达到对70 ~ 300mm厚的材料检测所需足够分辨力和覆盖区域。这些分区的检查可同时或单独进行。

表3 对于 70 ~ 300mm 厚钢的探头选择推荐参数

深度区域 mm	中心频率 MHz	晶片大小 mm	标称探头角度
0 ~ <30	5 ~ 10	2 ~ 6	50° ~ 70°
30 ~ <100	2 ~ 5	6 ~ 12	45° ~ 60°
100 ~ 300	1 ~ 3	10 ~ 25	45° ~ 60°

### 7.2.2 探头间隔

最大衍射效率在内角大约是120°时出现。探头放置的位置应满足能够使（想象中的）声束中心线在不连续可能出现的深度区内以大约这个角度相交。

偏离这个角度大于 - 30°或45°，可能导致衍射回波变弱，除非能证明其检测能力否则不可使用。

### 7.3 时窗设置

理论上，时窗记录应至少比侧向波到达的时间早开始1μs，并且应至少延伸到第一个背面回波。因为波型转换可用于缺欠的识别，所以建议时窗也包括第一个背面回波波型转换信号到达的时间。

作为最低要求，时窗应至少覆盖关注的深度区域，见表1和2。

用一个较小的时窗也是适当的（例如：为了提高定量精度），但很有必要验证缺欠检测能力，可用典型伤或附录A 参考试块中的衍射人工缺欠验证。

### 7.4 灵敏度设置

设置探头间隔和时窗以便后序检测。

设置灵敏度的目的是为了确保不连续信号幅度在数字转换器的范围内，并且确保限制噪声是声学噪声而不是电噪声。

设备设置（包括电噪声抑制和系统增益）调节到：侧向波到达之前的电噪声，比在侧向波到达之后的时基线区域内的电噪声，在幅度上至少低6dB。后者应被设置在幅度范围的5%左右。

现在可检查灵敏度设置，可使用典型伤或附录A参考试块中的衍射人工缺欠。得到的结果可证明降低增益设置是否正确或给出信噪比不足的警告。

#### 7.5 扫查分辨力设置

推荐探头移动一毫米记录一个A型扫查。

#### 7.6 扫查速度设置

扫查速度的选择应与7.3、7.4和7.5中的要求保持一致。

#### 7.7 系统性能检查

建议在检测前后通过记录并比较一组有限数量的典型A型扫描来检查系统性能。见JB/T 9214。

### 8 数据解释与分析

#### 8.1 不连续的基本分析

##### 8.1.1 概要

合同双方应在检查前就报告和验收规范达成一致。

用TOFD检测出的不连续应至少给出下列特征：

- 不连续的位置（ $x$ 坐标、必要时还需给出 $y$ 坐标）；
- 不连续的长度（ $\Delta x$ ）；
- 不连续的深度和高度（ $z$ 、 $\Delta z$ ）；
- 不连续的类型，限于“上表面开口”，“下表面开口”或“内部”。

##### 8.1.2 不连续的特征描述

为了描述缺欠的特征，缺欠端点衍射的相位判定如下：

- 与侧向波有相同表观相位的信号将被认为是由缺欠的下端所产生的；
- 与背面回波有相同表观相位的信号将被认为是由缺欠的上端或由不可测量高度的缺欠所产生的。

如果信噪比不足，难以检测出信号的相位，则这些识别无效。

##### 8.1.2.1 上表面开口缺欠

有下端衍射、侧向波中断或弱化的指示都将被认为是上表面开口缺欠。

有时能观察到侧向波向渡越时间延长方向的轻微移动。

##### 8.1.2.2 下表面开口不连续

有上端衍射且背面回波向渡越时间延长方向移动或者背面回波中断（检查耦合损失）的指示都将被认为是下表面开口缺欠。

##### 8.1.2.3 内部不连续

既有上端衍射又有下端衍射的指示将被认为是内部缺欠。

无侧向波或背面回波指示，只有明显上端衍射的指示将被认为是无高度的缺欠。但是注意，可能因为侧向波或背面回波的指示非常弱，而导致缺欠被错误地解释。如果不确定，将采取适当措施，进行多次TOFD扫查（见8.2.1）或使用其它技术。

如果要求进一步的特征描述，参考8.2。

如果对缺欠的解释存有疑问，应保留对缺欠最坏可能性的解释，直到解释被验证。

##### 8.1.3 缺欠位置的评定

通常，如果假设缺欠位于两个探头中间的 $X$ 、 $Z$ 平面和穿过两个探头中心线的 $Y$ 、 $Z$ 平面的交点处，这样得到的缺欠位置是足够准确的。

缺欠指示的渡越时间，也可用来评定它的位置。理论上，相同渡越时间的面是一个以超声探头入射点为圆心的椭圆面。只有通过至少两次扫查才能精确确定衍射体位置（见8.2.1）。

如果要求更加精确地评定缺欠的位置和（或）方向，必须进行多次TOFD扫查（非平行和（或）平行）。

#### 8.1.4 缺欠长度的评定

评定一个缺欠的长度，可通过移动探头进行一次非平行扫查直接获得。和所有超声波技术一样，由于超声束宽度有限，记录可能被延长，导致保守评定缺欠长度。

缺欠长度明显小于探头晶片大小1.5倍的指示，因为太小而无法用常规TOFD规程来定量其长度，但可通过附加算法来确定其缺欠长度（见8.2.2）。

#### 8.1.5 缺欠深度和高度的评定

假设超声波能量在探头的入射点进入和离开试件，缺欠位于两个探头的中间位置上（见8.1.3），缺欠深度就可通过下式得出：

$$d = \left[ \frac{1}{4}(ct)^2 - S^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中：

$c$  —— 声速；

$t$  —— 端点衍射信号的渡越时间；

$d$  —— 缺欠端点的深度；

$S$  —— 超声探头入射点间距的一半。

应减去超声信号在超声探头内的渡越时间，再计算深度。否则，将导致计算出的深度出现严重误差。

为了避免由于探头延迟的评定而引起的误差，如有可能，应由侧向波与衍射波渡越时间差  $t$  来计算深度  $d$ ，因而：

$$d = \frac{1}{2} \left[ (c\Delta t)^2 + 4c\Delta t S \right]^{1/2} \quad (2)$$

##### 8.1.5.1 上表面开口不连续

上表面开口缺欠的高度是由上表面和下端衍射信号深度的距离决定的。

##### 8.1.5.2 下表面开口不连续

下表面开口缺欠的高度是由上端衍射信号的深度和下表面间的距离决定的。

##### 8.1.5.3 内部缺欠

内部缺欠的高度是由上端衍射和下端衍射的深度差来决定的。

#### 8.2 不连续的详细分析

经过基本的TOFD扫查检测后的不连续可进行详细的缺欠分析。

另外，可考虑使用其它无损检测技术，以达到一个更加详细的特征描述。

详细分析缺欠的动机可能是：

——更加精确评定缺欠长度、深度和高度；

——评定缺欠方向；

——详细评定缺欠类型。

详细的缺欠分析包括采用不同的探头角度、频率和（或）探头间隔来进行附加扫查。平行扫查也可进行。详细分析也包括应用计算机算法来分析数据。

##### 8.2.1 附加的扫查

###### 8.2.1.1 以较低检测频率的扫查

如果信噪比很低以至于不能详细分析缺欠时，甚至多次平均也不行，可用较低检测频率扫查。通常，这种扫查会增大盲区和降低分辨力。

应优化设备设置参数（见第6章和第7章）。

###### 8.2.1.2 以较高检测频率的扫查

为了提高分辨力、提高定量精度和减小盲区，可用较高检测频率扫查，这是以增加晶粒噪声从而降低信噪比为代价。应优化设备设置参数（见第6章和第7章）。

### 8.2.1.3 减小探头角度的扫查

为了提高分辨力、提高定量精度和减少盲区，可减小探头角度或减小探头间距扫查，这是以减小试件声穿透体积为代价。应优化设备设置参数（见第6章和第7章）。

### 8.2.1.4 不同探头偏移的扫查

为了获得缺欠的横向位置（y - 方向）和（或）缺欠方向，可进行不同探头间距（偏移）的平行扫查或非平行扫查。应优化设备设置参数（见第6章和第7章）。

应检查：扫查中观察到的信号的相位关系应与初始扫查一致。

对于某个端点衍射信号（轨迹曲线），相同渡越时间的面是一个椭圆面。如果只考虑穿过两个探头 y、z 平面，则这个恒定声程的椭圆，可用下式表达：

$$ct = \left[ d^2 + (S - y)^2 \right]^{1/2} + \left[ d^2 + (S + y)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

由上式可知，衍射体距探头间中心平面的不同偏移（也就是不同的 y 值），将导致端点衍射的渡越时间不同，因此缺欠端点的表观深度将随着不同探头位置的扫查而发生变化。

缺欠端点的横向位置（y 方向）可直接由平行扫查中最小表观深度位置确定。需要在不同的 x 坐标上做多次相邻的平行扫查，以确定缺欠真实最小深度的位置。

一旦缺欠的两个端点的位置和深度已知，则缺欠方向就可由穿过两个缺欠端点的轴线来确定。

原则上，只要透声区覆盖足够的体积，两次偏移量不同的非平行扫查也足以对缺欠深度、长度和方向的精确确定。

然而，从两次非平行扫查中不能直接确定缺欠端点的位置，需要附加的软件（见 8.2.2）绘制轨迹曲线。

附加的平行扫查也可用于检测近表面缺欠，近表面缺欠由于接近侧向波或背面回波而很难探测。每次扫查中缺欠的表观深度都会发生变化，而附加的平行扫查能够区别出侧向波或背面回波从而解决这个问题。

### 8.2.2 附加的运算

计算机算法对于分析 TOFD 扫查中记录下的数据是很有用。

例如：

——曲线拟合叠加图可用于精确确定缺欠长度（参见 8.1.4）；

——为了发现缺欠指示可去掉侧向波和（或）背面回波以免干扰造成模糊（见 10.2）。如果表面粗糙不平，应试验验证该技术的有效性；

——线性算法可将整个 B 型扫描线性化，以精确确定缺欠的深度或高度；

——建模算法能够描绘轨迹曲线和分析波型转换信号，从而进一步识别缺欠位置、深度和方向。需要对物理原理和建模软件有深入的了解。

用于数据分析的算法条款应在检测前在合同中达成一致。

## 9 复杂几何形状的检测和定量

对于 2 级产品，如果两个探头间的表面是平的，就没有更多限制。否则，对于 2 级和所有 3 级产品，考虑到产品的曲率，需要改进检测工艺和解释方法。

对于 4 级和 5 级产品，将使用特殊的数据处理技术和提供特殊的实施条件。

这些情况下，适合使用计算机算法进行数据分析。

为了确定缺欠检测性能，这些情况下强烈建议使用含有自然伤或人工缺欠的典型测试试件。

## 10 技术的局限性

本章认为TOFD技术的局限性既适用于基本的TOFD检测，也适用于TOFD定量。本章规定了正常情况下可达到的精度限制，并且探讨了盲区对检测性能的影响。技术的整体可靠性是由许多起作用的因素决定的，整体误差将不低于本章中讨论的积累误差，这一点很重要。

严重倾斜或扭曲的缺欠，例如在非平行扫查中的横向裂纹，很难检测出来，这种情形建议进行详细的试验验证。另外，一些不严重的伤，例如点伤，看上去更像更严重的缺欠，例如裂纹。再次建议在适当时机，对TOFD技术辨别小裂纹的能力进行试验验证。性能验证可使检测更加精确或被其它证明文件引用。

#### 10.1 精度和分辨力

需要区别精度和分辨力。精度是确定反射体或衍射体位置能力的程度。分辨力是对区别邻近衍射体能力的程度。

TOFD测量的精度受定时误差、声速误差、探头间隔误差和横向位置指示误差影响。通常，横向位置指示误差对整体精度起主要作用。

##### 10.1.1 横向位置误差

如8.1.3所述，缺欠指示的横向位置通常被假设为两个探头的中间。事实上缺欠指示将位于一个椭圆上[式(3)]，由横向位置误差（ $\delta y$ ）造成的深度误差（ $\delta d$ ）可由下式计算：

$$\delta d = (c^2 t^2 - 4S^2)^{1/2} (\delta y^2 / c^2 t^2) / [(0.25 - \delta y^2 / c^2 t^2)]^{1/2} \quad (4)$$

原则上，声束的下边缘决定着 $\delta y$ 。如果波束下边缘无可靠的数据可用，将使用 $\delta y = S$ 。

##### 10.1.2 定时误差

由定时误差（ $\delta t$ ）造成的缺欠指示深度的精度限制，可通过下式评估：

$$\delta d = c \delta t [d^2 + S^2]^{1/2} / 2d \quad (5)$$

式中

$\delta d$ ——深度 $d$ 的误差。

使用较窄脉冲和（或）较高频率可降低定时误差。

##### 10.1.3 声速误差

由于声速误差（ $\delta c$ ）造成的缺欠指示深度的精度限制，如下式所示：

$$\delta d = \delta c \left[ d^2 + S^2 - S(d^2 + S^2)^{1/2} \right] / cd \quad (6)$$

该误差随着探头间距的减小而减小。已知壁厚的情況下，通过测量背面回波的延迟时间来单独校准声速，能大大降低声速误差。

##### 10.1.4 探头间距误差

两个入射点间距离的误差（ $\delta S$ ）会造成深度测量的误差，深度误差 $\delta d$ 可通过下式计算：

$$\delta d = \delta S \left[ (d^2 + S^2)^{1/2} - S \right] / d \quad (7)$$

应注意探头间距误差是由探头间距离测量误差和入射点校准误差引起的。

当探头间距小于试件厚度的二倍，入射点不再被认为是一个固定的点，而是深度的函数。既然如此，如果需要精确定量，将借助于典型试件进行深度测量校准。

##### 10.1.5 空间分辨力

空间分辨力（ $R$ ）是深度的一个函数，并且可通过下式计算：

$$R = \left[ c^2 (t_d + t_p)^2 / 4 - S^2 \right]^{1/2} - d \quad (8)$$

式中：

$t_p$  ——声脉冲的长度；

$t_d$  ——在深度  $d$  的渡越时间。

分辨率随着深度的增加而增加，并且能通过减小探头间距或声脉冲长度而得到提高。

## 10.2 盲区

由于侧向波的存在，在扫查面附近造成一个盲区 ( $D_{ds}$ )。在盲区中，侧向波和缺欠指示之间的互相干扰造成指示模糊。盲区深度通过下式表达：

$$D_{ds} = [c^2 t_p^2 / 4 + S c t_p]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

由于背面回波的存在，在背面附近造成一个盲区 ( $D_{dw}$ )，背面盲区的深度可通过下式表达：

$$D_{dw} = [c^2 (t_w + t_p)^2 / 4 - S^2]^{\frac{1}{2}} - W \quad (10)$$

式中：

$t_w$  ——背面回波的渡越时间；

$W$  ——壁厚。

通过减小探头间距或使用窄脉冲探头能够减小这两个盲区。

## 11 无数据记录的 TOFD 检测

在手动 TOFD 中，直接通过 A 型扫描进行解释，并用未检波的信号显示。

这种形式 TOFD 技术只用于简单几何形状的产品等级中，并且设备设置应符合 7.2、7.3 和 7.4 的要求。

通常，无数据记录的 TOFD 检测不能像有数据记录那样进行详细研究。更难以检测相位变化、传输时间的微小变化和靠近侧向波的缺欠回波。

## 12 检测工艺规程

TOFD 的检测工艺规程应符合 GB/T 5616 中的要求。

具体应用条件和 TOFD 技术的应用将取决于待检产品的类型和具体要求，并且以书面形式加以描述。

## 13 检测报告

TOFD 检测报告应至少包含以下内容：

- 委托单位；
- 被检工件：名称、编号、规格、材质；
- 检测地点；
- 被检工件状态：热处理状态、表面状态；
- 检测设备：包括仪器、探头、耦合剂等；
- 检测所依据的相关文件和标准；
- 检测人员和责任人员的姓名、资格和签字；
- 检测日期；
- 检测结果及评定；
- 工艺偏差。

另外，TOFD 检测报告还应包含下列内容：

- 如果使用了测试试件和参考试块，要对该测试试件和参考试块进行描述；

- 探头类型、探头频率、探头角度、探头间距和相对于参考线（如焊缝中心线）的位置；
- 所绘制图像（硬拷贝）至少包含检测到的缺欠指示所在的区域。设备设置细节和检测灵敏度设置方法。

此外，检测期间所有原始记录数据，需储存在一个磁性或光学存储介质中，例如：硬盘、软盘、磁带或光盘，作为以后的参考。



附 录 A  
(规范性附录)  
参 考 试 块

参考试块是用来正确调整系统灵敏度和形成足够的空间覆盖。

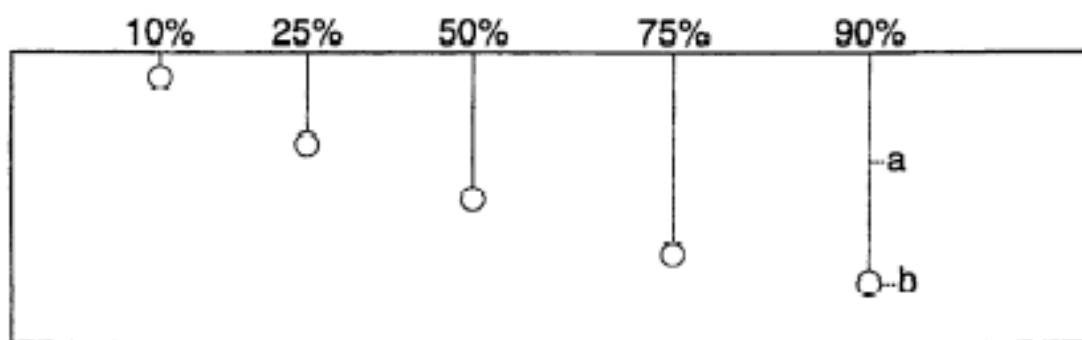
对参考试块的最低要求如下：

- a) 应使用与待检工件特征相近材料制成（例如声速、晶粒噪声和表面条件）；
- b) 壁厚应等于或大于待检工件的标称壁厚；
- c) 扫查面的宽度和长度应足够探头在参考衍射体上方的移动。

测量应以从参考衍射体发出的衍射信号为基础，参考试块有如下两种类型：

- a) 凹槽——开口于参考试块的扫查面的机加工凹槽；
- b) 横孔——孔的直径至少是检测使用探头标称频率对应波长的二倍，此孔切至扫查面，以防止横孔顶端的直接反射，见图A.1。

参考衍射体应位于待检工件标准厚度的大约10%、25%、75%和90%处。



a——切口；b——横孔。

图 A.1 参考试块的略图，采用与扫查面切通的横孔作为参考衍射体