

ICS 19.100

CCS H 26

# 团体标准

T/CASEI XXX-XXXX

## 热壁加氢反应器的衍射时差法超声检测技术要求

Technical requirements for ultrasonic time of  
flight diffraction testing of hot wall  
hydrogenation reactor

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国特种设备检验协会 发布

目次

前 言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 2

4 一般要求 ..... 6

5 检测工艺参数的选择和设置 ..... 15

6 检则 ..... 20

7 检测数据的分析和解释 ..... 22

8 非平行扫查缺陷的评定、质量分级及验收 ..... 25

9 平行扫查（平行焊缝）横向再热裂纹的评定 ..... 27

10 检测记录和报告 ..... 27

附录 A 堆焊层层下母材裂纹检测 （资料性附录） ..... 29

附录 B 容器过渡段与筒体、封头与过渡段对接接头 TOFD 检测方法 （资料性附录） ..... 31

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

本标准由中国特种设备检验协会提出并归口。

本标准负责起草单位：一重集团大连核电石化有限公司、中国特种设备检测研究院。

本标准参加起草单位：中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司、中国石化工程建设有限公司、中石化广州工程有限公司、中石油华东设计院有限公司、华东理工大学、合肥通用机械研究院、森松（江苏）重工有限公司、齐齐哈尔市检验检测中心、大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司、国能锅炉压力容器检验有限公司、南阳汉冶特钢有限公司、吉林市特种设备检验中心、北京市朝阳区特种设备检测所、天津市特种设备监督检验技术研究院、江苏省特种设备安全监督检验研究院连云港分院、北京邹展麓城科技有限公司。

本标准主要起草人：程明、杨齐、胡庆斌、周凤革、王浩为、尹青峰、张国信、谢育辉、朱明亮、陈贤洮、江雁山、李辉、刘中军、郝晓军、杨阳、王德林、程红伟、刘怿欢、丁小平、梁庆业、李剑峰

考虑到本文件中的某些条款可能涉及专利，中国特种设备检验协会不负责对其任何该类专利的鉴别。

本标准为首次发布。

# 热壁加氢反应器的衍射时差法超声检测技术要求

## 1 范围

- 1.1 本技术要求规定了热壁加氢反应器采用衍射时差法超声检测（以下简称“TOFD”）的方法和质量分级要求。
- 1.2 本部分适用于同时具备下列条件的焊接接头：
- a) 材料为低碳钢或低合金钢；
  - b) 全焊透结构型式的对接接头；
  - c) 工件公称厚度  $t$ ：12mm $\leq t \leq$ 400mm（不包括焊缝余高，焊缝两侧母材公称厚度不同时，取薄侧公称厚度值）。
  - d) 对于公称厚度  $t > 400$ mm 的全焊透对接接头，经试验验证其检测能力满足本技术条件规定的缺陷检出要求及评定精度，并取得相关监管部门的检测许可后，可参照本技术条件的相关规定执行。
- 1.3 对于基材（材质为低碳钢或低合金钢）公称厚度大于或等于 12mm 的特种设备用奥氏体不锈钢、镍合金等堆焊层热壁加氢反应器，以及不锈钢-钢复合板、钛-钢复合板、铝-钢复合板和镍-钢复合板，从基材侧进行的对基材对接接头的 TOFD 检测可参照本部分使用。
- 1.4 对于热壁加氢反应器的支撑件和结构件，以及满足本部分检测条件的插入式接管角接头，可参照本部分执行；对于其他细晶各向同性且低声衰减的金属材料，参照本部分执行时应充分考虑超声特性的差异；对于堆焊层层下裂纹的检测，可参考本技术要求附录 A 执行。
- 1.5 当焊接接头两侧母材公称厚度不相等时，可参照 NB/T 47013.10-2015 附录 A 进行检测。
- 1.6 对于容器封头与过渡段以及过渡段与筒体不等厚焊接接头，可参考本技术要求附录 B 执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

|              |                             |
|--------------|-----------------------------|
| GB/T 12604.1 | 无损检测 术语 超声检测                |
| GB/T 27664.1 | 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 1 部分：仪器 |
| GB/T 27664.2 | 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 2 部分：探头 |
| JB/T 9214    | 无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法 |
| JB/T 10062   | 超声探伤用探头 性能测试方法              |

|                    |                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| JB/T 8428          | 无损检测 超声试块通用规范                                                                                                                                                                                        |
| NB/T47013.1        | 承压设备无损检测 第1部分：通用要求                                                                                                                                                                                   |
| NB/T47013.2        | 承压设备无损检测 第2部分：射线检测                                                                                                                                                                                   |
| NB/T47013.3        | 承压设备无损检测 第3部分：超声检测                                                                                                                                                                                   |
| NB/T47013.4        | 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测                                                                                                                                                                                   |
| NB/T47013.5        | 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测                                                                                                                                                                                   |
| NB/T47013.6        | 承压设备无损检测 第6部分：涡流检测                                                                                                                                                                                   |
| NB/T 47013.10-2015 | 承压设备无损检测 第10部分：衍射时差法超声检测                                                                                                                                                                             |
| API RP 934-A       | Materials and Fabrication of 2¼Cr-1Mo, 2¼Cr-1Mo-¼V, 3Cr-1Mo, and 3Cr-1Mo-¼V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service（高温高压临氢环境用厚壁铬钼钢压力容器的材料与制造规范，规范性引用） |

3 术语和定义

GB/T 12604.1、NB/T 47013.1 界定的术语和定义适用于本部分。

3.1 热壁加氢反应器 Hot-Wall Hydrogenation Reactor

石油化工、煤化工领域加氢裂化、加氢精制工艺的核心承压设备，内壁具有耐腐蚀堆焊层或复合板，长期服役于高温高压的临氢腐蚀环境（含烃类、硫化物），需耐受高温蠕变、氢致开裂、硫化物应力腐蚀等考验。设备主体采用 12Cr2Mo1R 等铬钼钢材料，经分段锻造组焊成型，典型内径 3~6m、长度 20~40m、筒体壁厚 100~350mm。

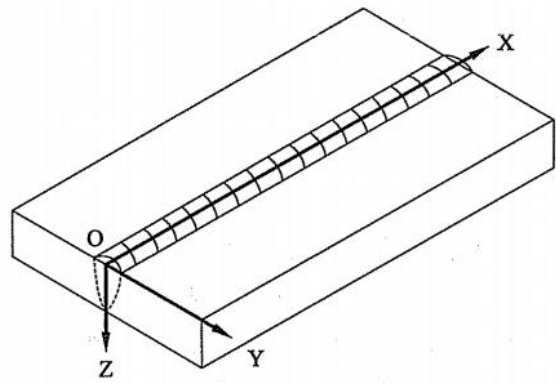
3.2 横向再热裂纹 Transverse Reheat Crack

本文中特指铬钼加钒钢材料采用 SAW 焊接方式的焊接接头在经历大于 620℃热处理后，在其热影响区（多为粗晶热影响区）或焊缝金属内，因应力松弛与晶界弱化等作用产生的走向与焊缝大致垂直的裂纹，常成簇出现于焊接接头金属及热影响区。

3.3 坐标定义 coordinate definition

规定检测起始参考点 O 点以及 X、Y 和 Z 坐标的含义，见图 3-1。

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 3-1 坐标定义

### 3.4 TOFD time of flight diffraction

衍射时差法超声检测，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。

### 3.5 扫查面 scanning snrface

放置探头并进行扫查的工件表面。

### 3.6 底面 back wall

与扫查面相对的工件另一侧表面。

### 3.7 直通波 lateral wave

从发射探头沿工件以最短路径到达接收探头的超声波。

### 3.8 底面反射波 back wall echo

从发射探头经底面反射到接收探头的超声波。

### 3.9 探头中心自距 probe centre separation (PCS)

发射探头和接收探头入射点之间的直线距离。

### 3.10 非平行扫置 non-parallel scan

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 3-2。

### 3.11 偏置非平行扫查 offset-scan

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 3-3。

### 3.12 平行扫查 parallel scan

探头运动方向与声束方向平行的扫查方式，分为两类：其一为探头对连线垂直于焊缝中心线、沿 Y 轴方向移动的扫查方式，称为平行扫查（垂直焊缝）（见图 3-4-1）；其二为探头对连线平行于焊缝中心线、沿 X 轴方向移动的扫查方式，称为平行扫查（平行焊缝）（见图 3-4-2）。

### 3.13 斜向扫查 oblique scan

探头沿 X 轴方向运动，且探头对连线与焊缝中心线成  $30^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$  夹角的扫查方式，见图 3-5。

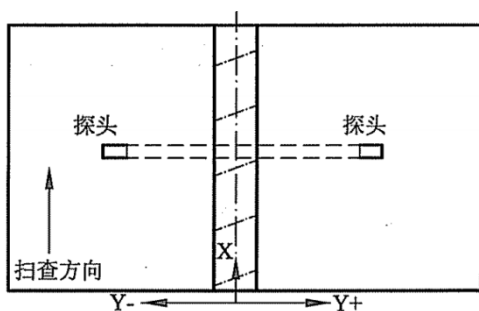


图 3-2 非平行扫查

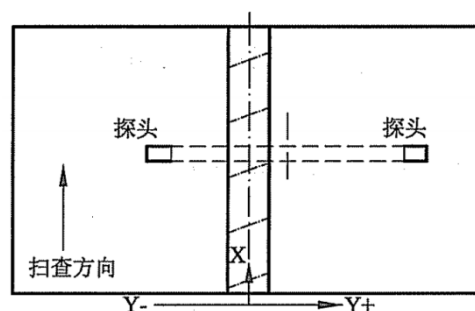


图 3-3 偏置非平行扫查

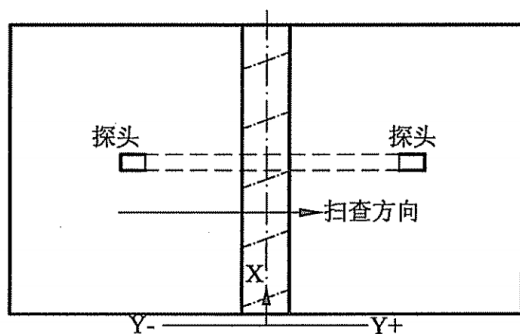


图 3-4-1 平行扫查（垂直焊缝）

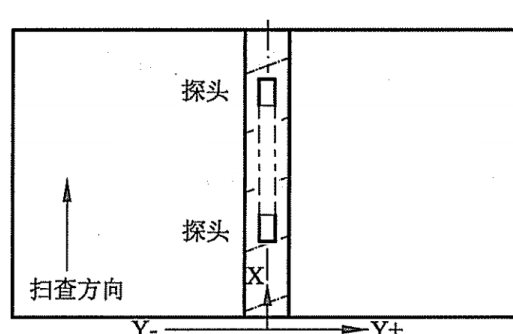


图 3-4-2 平行扫查（平行焊缝）

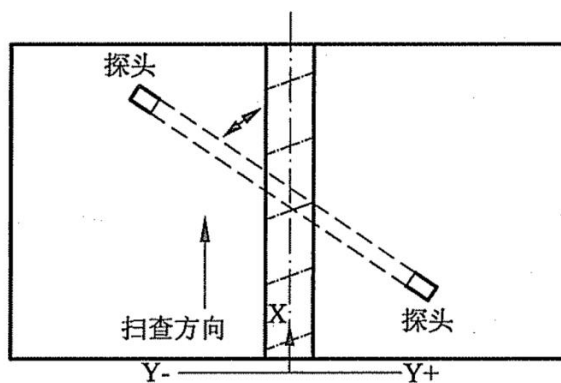


图 3-5 斜向扫查

### 3.14 底面盲区 back wall dead zone

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。

### 3.15 初始底面盲区高度 original height of back wall dead zone

以非平行扫查时检测区域边界处的底面盲区高度值表征，见图 3-6 中  $h_d$ 。

### 3.16 扫查面盲区 scanning surface dead zone

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。

### 3.17 初始扫查面盲区高度 original height of scanning surface dead zone

以非平行扫查时 TOFD 探头对中心线处的扫查面盲区高度值表征，见图 3-7 中  $h_5$ （假定直通波宽度为 2 周）。

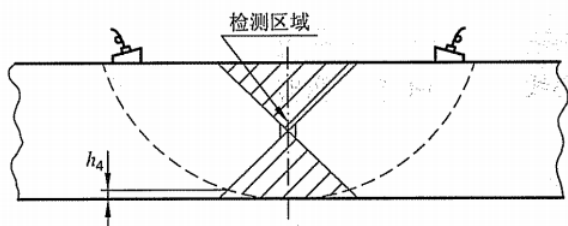


图 3-6 初始底面盲区高度

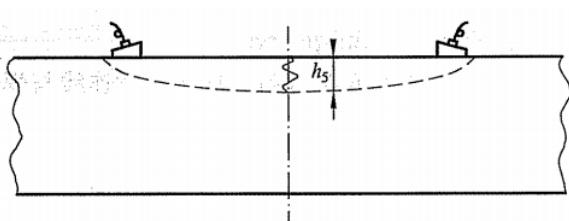


图 3-7 初始扫查面盲区高度

### 3.18 A 扫描信号 A-scan signal

超声波信号的波形显示，水平轴表示超声波的传播时间，垂直轴表示波幅。

### 3.19 TOFD 图像 TOFD image

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。

### 3.20 相关显示 relevant indications

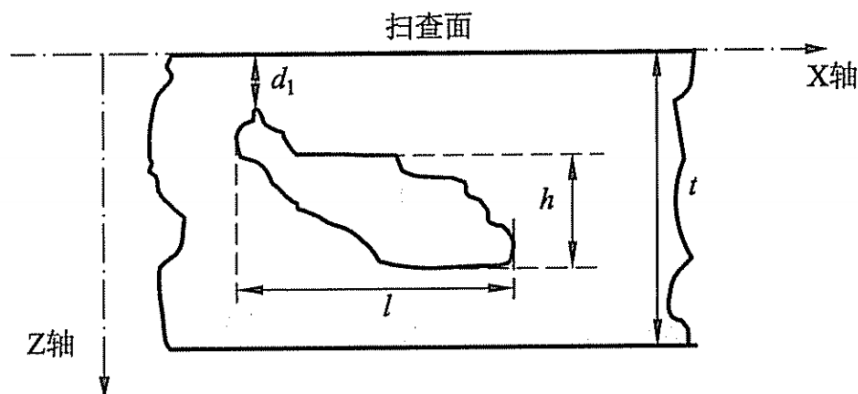
TOFD 图像中，由缺陷引起的显示。

### 3.21 非相关显示 non-relevant indications

TOFD 图像中，由于工件结构（例如焊缝余高或根部）或者材料冶金成分的偏差（例如铁素体基体和奥氏体覆盖层的界面）引起的显示为非相关显示。

### 3.22 缺陷深度 flaw depth

缺陷上端点与扫查面间的最短距离，见图 3-8 中  $d_1$ 。

图 3-8 缺陷长度  $l$ 、缺陷深度  $d_1$  和缺陷自身高度  $h$ 

### 3.23 缺陷长度 flaw length

缺陷在 X 轴投影间的距离，见图 3-8 中  $l$ 。

### 3.24 缺陷自身高度 **flaw height**

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 3-8 中  $h$ 。

### 3.25 相位反转实心显示 **phase reversed solid indication**

缺陷的上端点相位与工件直通波相位呈  $180^\circ$  反向，或下端点相位与工件底波相位呈  $180^\circ$  反向，且缺陷波形饱满完整，能直观反映缺陷反射面平整连续的一类特征信号，是甄别平面型缺陷的核心辅助判据。

## 4 一般要求

### 4.1 检测人员

4.1.1 从事 TOFD 检测的人员应当符合 NB/T47013.1 的要求。

4.1.2 TOFD 检测人员应熟悉所使用的 TOFD 检测设备器材。

4.1.3 TOFD 检测人员应具有实际检测经验并掌握一定的承压设备结构及制造基础知识。

### 4.2 检测设备和器材

#### 4.2.1 检测设备

4.2.1.1 检测设备包括仪器、探头、扫查装置和附件，附件是实现设备检测功能所需的其他物件；器材包括试块和耦合剂等。

4.2.1.2 仪器和探头应符合其相应的产品标准规定，具有产品质量合格证明文件。仪器合格证明文件中至少应给出预热时间、低电压报警或低电压自动关机电压、发射脉冲重复频率、有效输出阻抗、发射脉冲电压、发射脉冲宽度（采用方波脉冲作为发射脉冲的）以及接收电路频带等主要性能参数；探头产品质量合格证中至少应给出中心频率、电阻抗或静电容、相对脉冲回波灵敏度和频带相对宽度等主要性能参数。

#### 4.2.1.3 检测仪器、探头及其组合性能的要求

4.2.1.3.1 检测仪器至少应具有超声波发射、接收、放大、数据自动采集、记录、显示和分析功能，其电气性能和功能应满足 NB/T47013.10-2015 附录 B 的要求并提供证明文件，电气性能测试方法参照 GB/T 27664.1 的规定。

#### 4.2.1.3.2 探头

4.2.1.3.2.1 通常采用两个分离的宽带窄脉冲纵波斜入射探头，一发一收相对放置组成探头对，固定于扫查装置；探头的性能指标应满足 NB/T47013.10-2015 附录 B 的要求并提供证明文件，测试方法参照 GB/T27664.2 的规定。

4.2.1.3.2.2 在能证明具有所需的检测和测量能力情况下，也可使用其他型式的探头，如相控阵探头、横波探头或电磁超声探头等。

#### 4.2.1.3.3 检测仪器和探头的组合性能

4.2.1.3.3.1 检测仪器和探头的组合性能包括水平线性、垂直线性、灵敏度余量、组合频率、 $-12\text{dB}$  声束扩散角和信噪比。

#### 4.2.1.3.3.2 发生以下情况时应测定仪器和探头的组合性能：

- a) 新购置的 TOFD 仪器和（或）探头；
- b) TOFD 仪器和探头在维修或更换主要部件后；
- c) 检测人员有怀疑时。

4.2.1.3.3.3 水平线性不大于 1%，垂直线性不大于 5%。

4.2.1.3.3.4 灵敏度余量应不小于 42dB。

4.2.1.3.3.5 仪器和探头的组合频率与探头标称频率之间偏差不得大于 $\pm 10\%$ 。

4.2.1.3.3.6 采用本部分规定的对比试块时，在合适的检测设置下能使检测区域范围内的反射体衍射信号幅度达到满屏的 50%，并有 8dB 以上的信噪比。

4.2.1.3.3.7 水平线性、垂直线性和灵敏度余量的测试方法按 JB/T9214 的规定，组合频率的测试方法参照 JB/T10062 的规定，仪器和探头组合的-12dB 声束扩散角测定方法见 NB/T47013.10-2015 附录 C。

#### 4.2.1.4 扫查装置

4.2.1.4.1 扫查装置一般包括探头夹持部分、驱动部分和导向部分，并安装位置传感器。

4.2.1.4.2 探头夹持部分应能调整和设置探头中心间距，在扫查时保持探头相对位置不变。

4.2.1.4.3 导向部分应能在扫查时使探头运动轨迹与拟扫查线保持一致。

4.2.1.4.4 驱动部分可以采用马达或人工驱动。

4.2.1.4.5 位置传感器的分辨率和精度应符合本部分的工艺要求。

#### 4.2.2 耦合剂

4.2.2.1 应采用有效且适用于被检工件的介质作为耦合剂，一般基材侧扫查采用水作为耦合剂。

4.2.2.2 选用的耦合剂应在工艺规程规定的温度范围内保证稳定可靠。

#### 4.2.3 试块

##### 4.2.3.1 标准试块

标准试块是指用于仪器探头系统性能校准的试块，本部分采用的标准试块为 CSK-IA 和 DB-Z20-2，其应满足 NB/T 47013.3 中的相关要求。

##### 4.2.3.2 对比试块

4.2.3.2.1 对比试块是指用于检测校准的试块。

4.2.3.2.2 对比试块可采用无焊缝的板材、管材或锻件，也可采用焊接件；其声学性能应与工件相同或相似，外形尺寸应能代表工件的特征和满足扫查装置的扫查要求；对比试块中的反射体采用机加工方式；按本部分图样制作加工的对比试块应满足规定的尺寸精度要求并提供相应的证明文件。

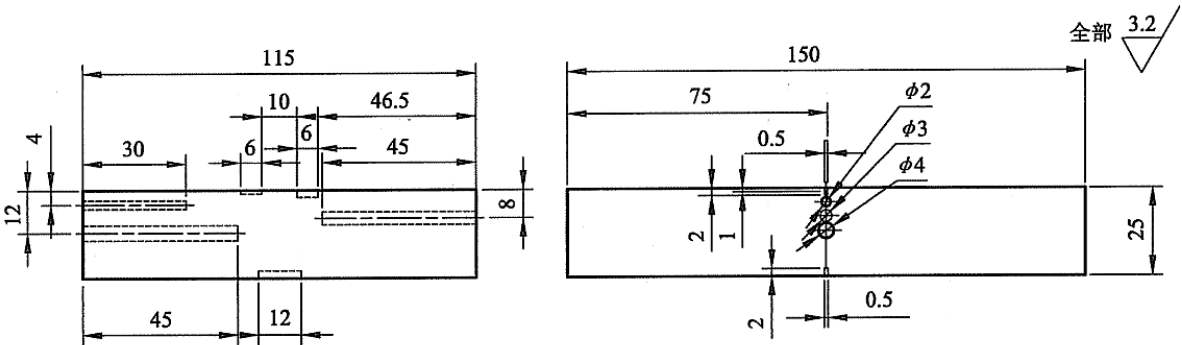
4.2.3.2.3 试块加工前应进行超声检测。对比试块材料中超声波声束可能通过的区域用直探头检测时，不得有大于或等于  $\phi 2\text{mm}$  平底孔当量直径的缺陷。

4.2.3.2.4 检测曲面工件的纵缝时，若工件曲率半径大于或等于 150mm 时，可采用平面对比试

块；当检测面曲率半径小于 150mm 时，应采用曲率半径为工件 0.9 倍~1.5 倍的曲面对比试块，曲面对比试块中的反射体形状、尺寸和数量与同厚度的平面对比试块一致。

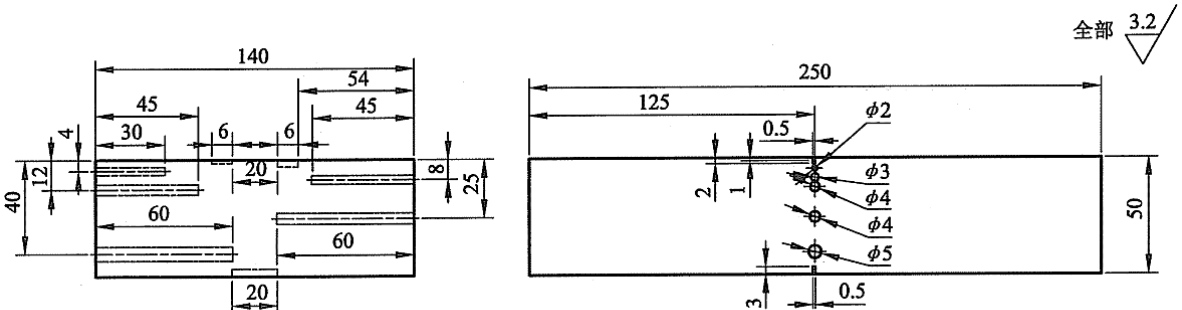
4.2.3.2.5 本部分采用的平面对比试块如下：

- a) TOFD-A 对比试块：适用于厚度为  $12\text{mm} \leq t \leq 25\text{mm}$  工件检测，见图 4-1；
- b) TOFD-B 对比试块：适用于厚度为  $12\text{mm} \leq t \leq 50\text{mm}$  工件检测，见图 4-2；
- c) TOFD-C 对比试块：适用于厚度为  $12\text{mm} \leq t \leq 100\text{mm}$  工件检测，见图 4-3；
- d) TOFD-D 对比试块：适用于原度为  $12\text{mm} \leq t \leq 200\text{mm}$  工件检测，见图 4-4；
- e) TOFD-E 对比试块：适用于厚度为  $12\text{mm} \leq t \leq 400\text{mm}$  工件检测，见图 4-5；
- f) TOFD-F 对比试块：适用于厚度为  $12\text{mm} \leq t \leq 500\text{mm}$  工件检测，见图 4-6；



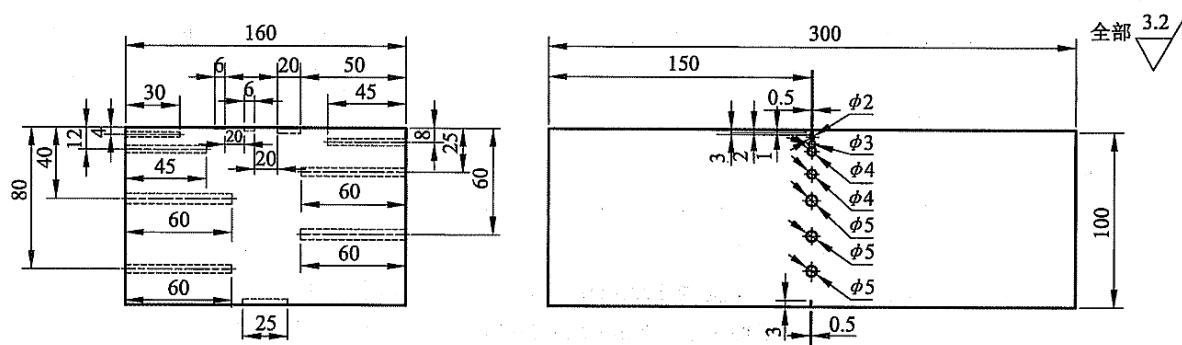
注：孔径误差不大于 $\pm 0.02\text{mm}$ ，开孔垂直度偏差不大于 $\pm 0.1^\circ$ ，其他尺寸误差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

图 4-1 TOFD-A 对比试块



注：孔径误差不大于 $\pm 0.02\text{mm}$ ，开孔垂直度偏差不大于 $\pm 0.1^\circ$ ，其他尺寸误差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

图 4-2 TOFD-B 对比试块



注：孔径误差不大于 $\pm 0.02\text{mm}$ ，开孔垂直度偏差不大于 $\pm 0.1^\circ$ ，其他尺寸误差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

图 4-3 TOFD-C 对比试块

图 4-4 TOFD-D 对比试块

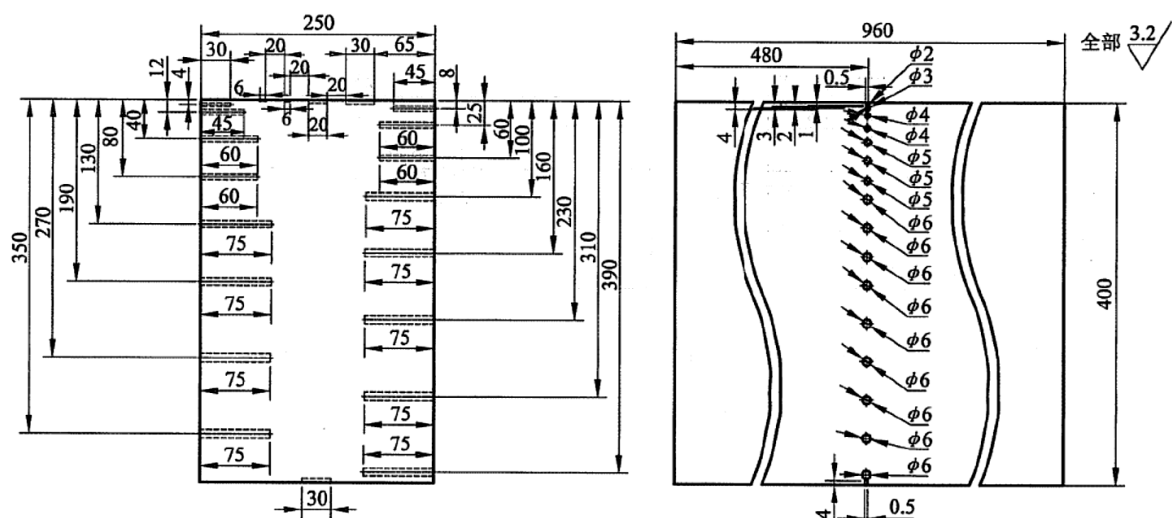


图 4-5 TOFD-E 对比试块

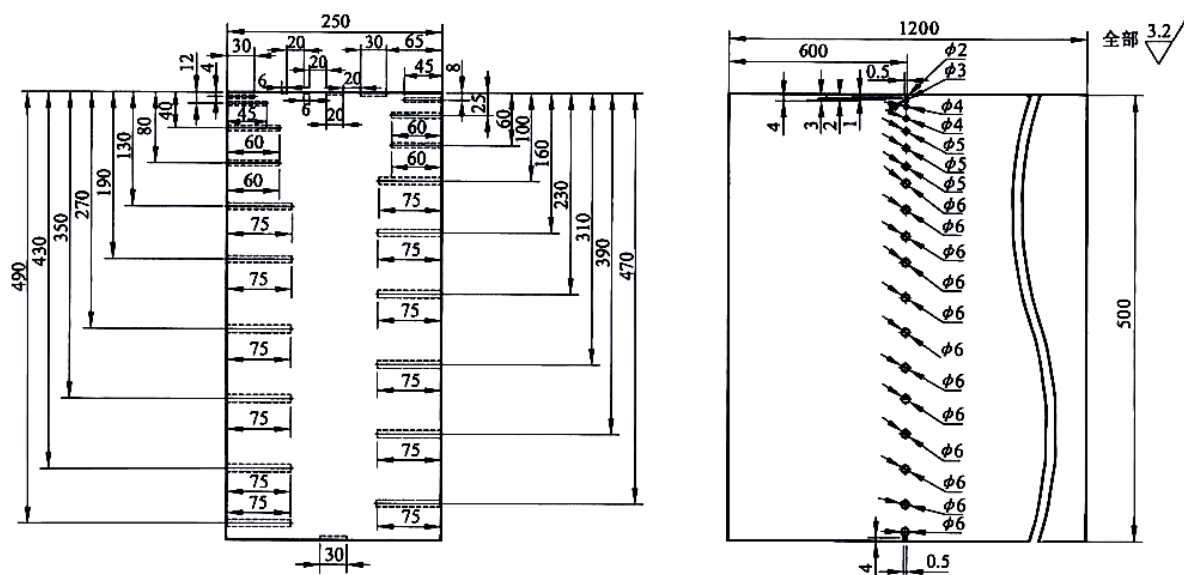


图 4-6 TOFD-F 对比试块

4.2.3.2.6 平面对比试块也可采用其他结构形式，应满足以下要求：

- a) 满足 4.2.3.2.2~4.2.3.2.3 要求；
- b) 对比试块厚度应不小于被检工件的 0.9 倍；
- c) 对比试块中反射体的形状、尺寸和数量满足 NB/T47013.10-2015 附录 D 的规定。

4.2.3.2.7 检测特殊结构的工件时，如削边处理的不等厚工件对接接头，建议采用专用对比试块，专用对比试块按照以下要求：

- a) 满足 4.2.3.2.2~4.2.3.2.3 要求；
- b) 专用对比试块厚度、外形应与工件基本一致；
- c) 专用对比试块中反射体的形状、尺寸和数量参照 NB/T47013.10-2015 附录 D 的规定；
- d) 根据检那需要应在难以检测的部位增加反射体。
- e) 从堆焊层侧进行检测所用的对比试块，应在上述试块基本形式上具有与被检工件堆焊工艺相同、厚度相近（ $\pm 2\text{mm}$ ）的堆焊层，试块堆焊层的表面制备方式及状态应与工件基本一致。

4.2.3.2.8 扫查面盲区高度测定试块

4.2.3.2.8.1 扫查面盲区高度测定试块用于测定初始扫查盲区高度。

4.2.3.2.8.2 扫查面盲区高度测定试块见图 4-6。

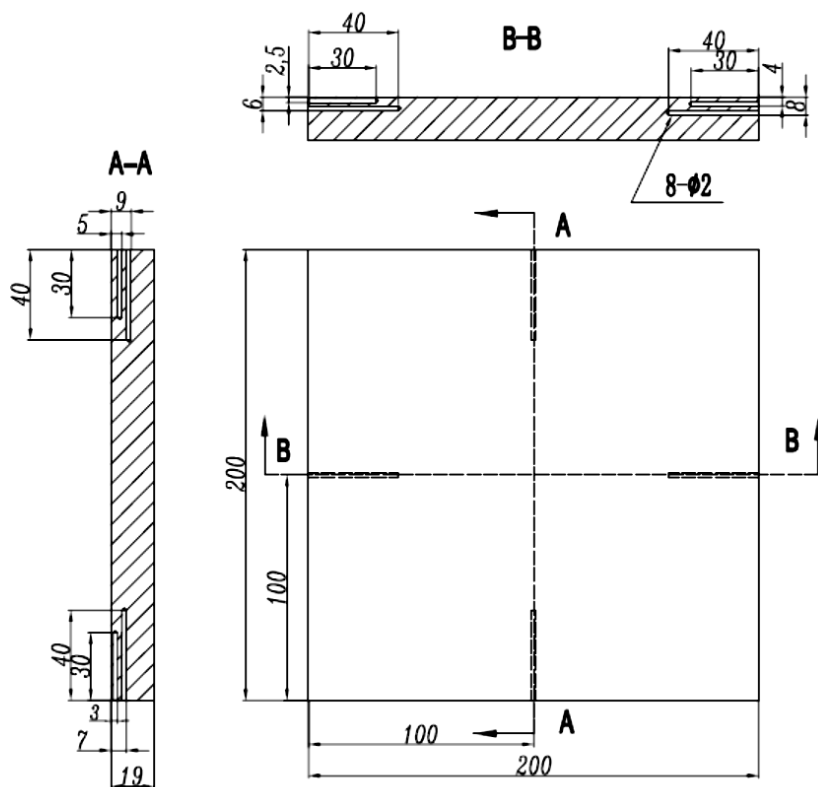
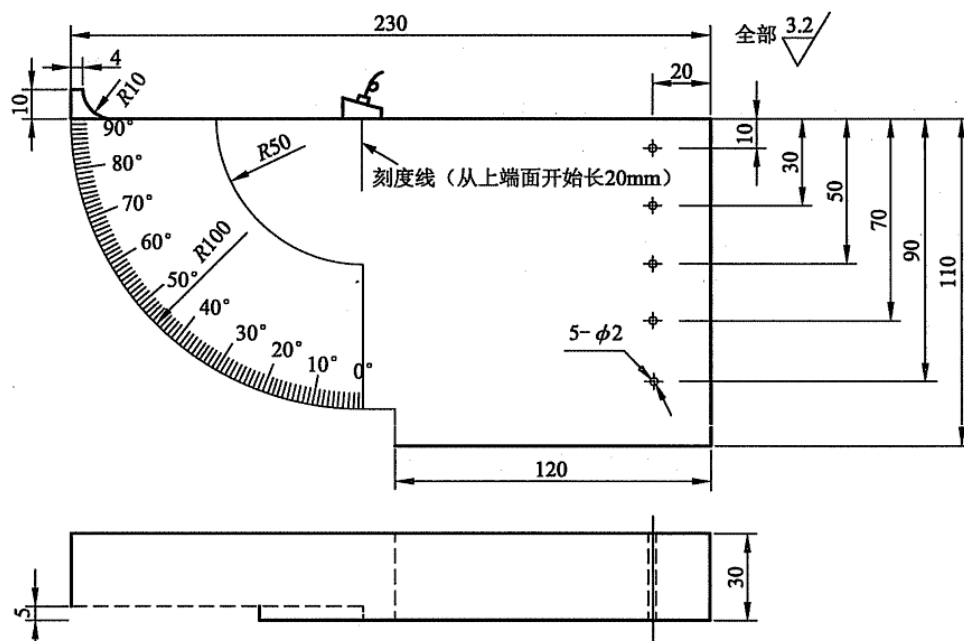


图 4-6 扫查面盲区高度测定试块

4.2.3.2.9 声束扩散角测定试块

4.2.3.2.9.1 声束扩散角测定试块用于测定检测仪器探头组合的实际-12dB 声束扩散角。

4.2.3.2.9.2 声束扩散角测定试块见图 4-7。



注：尺寸偏差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ ，角度偏差不大于 $\pm 0.5^\circ$ 。

图 4-7 声束扩散角测定试块

#### 4.2.3.3 模拟试块

4.2.3.3.1 模拟试块是指含有模拟缺陷的试块，用于 TOFD 检测工艺验证。

4.2.3.3.2 模拟试块的材质应与被检工件声学特点相同或相似，外形尺寸应能代表工件的特征且满足扫查装置的扫查要求，厚度应不小于被检工件的 0.9 倍。

4.2.3.3.3 模拟试块中的模拟缺陷应采用焊接工艺制备或使用以往检测中发现的真实缺陷。

4.2.3.3.4 对于模拟试块中的模拟缺陷，应满足以下要求：

- a) 位置要求：壁厚  $t \leq 50\text{mm}$  的模拟试块，上表面、下表面和内部至少各一处；壁厚  $t > 50\text{mm}$  的模拟试块，应保证按 5.2.3 要求进行分区检测时，每个厚度分区内至少有一处埋藏缺陷。
- b) 类型要求：至少应包括纵向缺陷、横向缺陷各 1 处；体积型、面积型缺陷各 1 处。
- c) 尺寸要求：一般不大于表 8-2 中 II 级规定的同厚度工件的最大允许缺陷尺寸。
- d) 若一块模拟试块中未完全包含上述缺陷，可由多块同范围的模拟试块组成。

#### 4.2.3.4 横向再热裂纹灵敏度验证试块

4.2.3.4.1 横向再热裂纹灵敏度验证试块是含有模拟横向再热裂纹人工矩形槽的验证试块，用于 TOFD 检测横向缺陷检测时采用平行扫查（平行焊缝）的检测灵敏度验证。

4.2.3.4.2 横向再热裂纹灵敏度验证试块中，沿试块厚度方向按每  $0.1T$  ( $T$  为试块公称厚度) 的深度间隔、沿长度方向 ( $X$  轴) 按每  $0.1T$  的水平间隔，加工一系列相互平行的尺寸为  $4\text{mm} \times 0.4\text{mm} \times 4\text{mm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的 EDM 槽；槽的起始位置距试块检测面近表面  $6\text{mm}$ 。(见图 4-8)

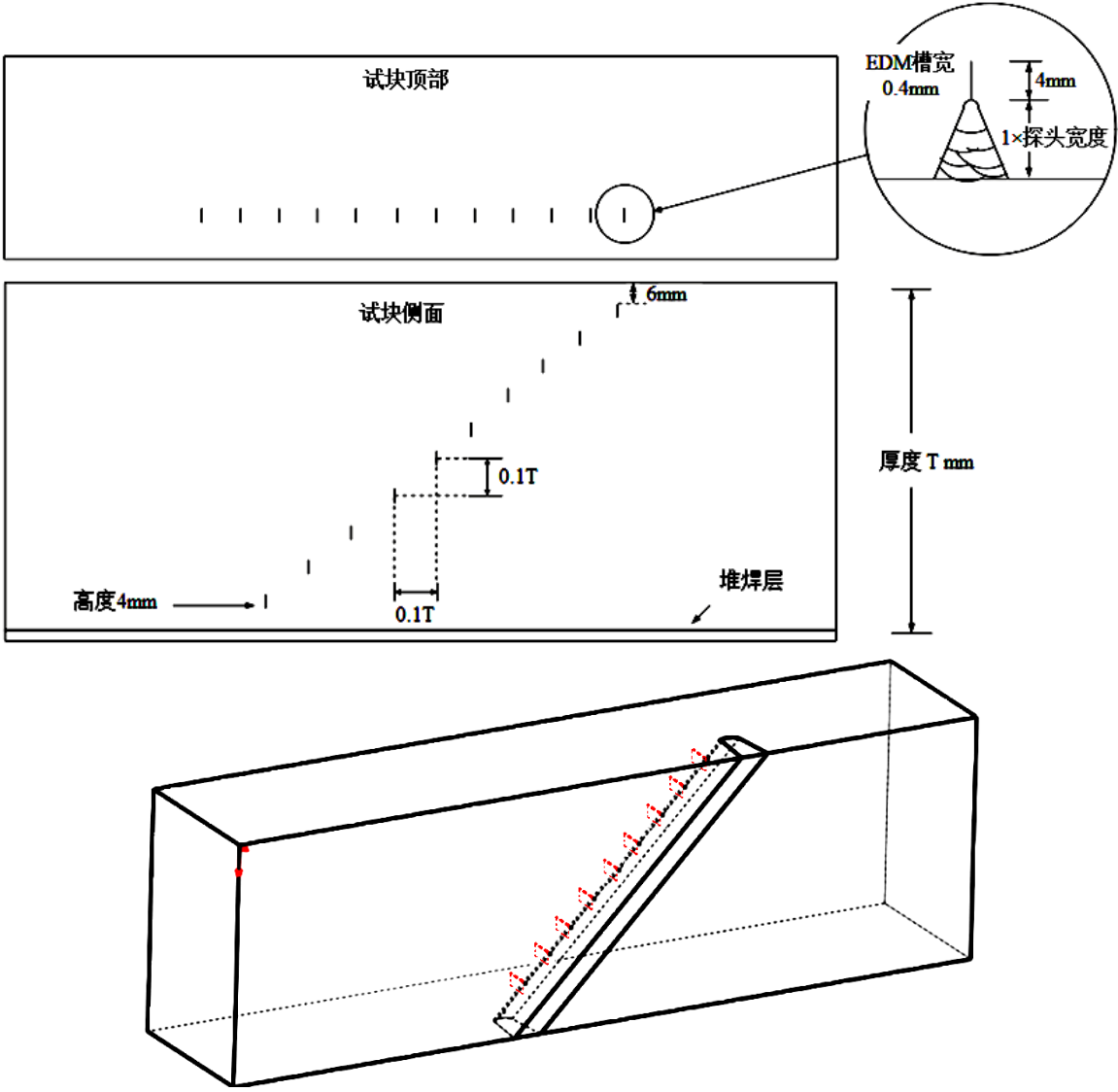


图 4-8 横向再热裂纹灵敏度验证试块

4.2.4 检测设备和器材的校准、核查、运行核查和检查的要求

4.2.4.1 校准、核查、运行核查和检查应在标准试块和对出试块上进行，测试时应使探头主声束垂直对准反射体，以获得稳定和最大的反射信号。

4.2.4.2 校准或核查

4.2.4.2.1 每年至少对检测仪器和探头组合性能中的水平线性、垂直线性、组合频率和灵敏度余量以及仪器的衰减器精度，进行一次校准并记录，测试要求应满足 4.2.1.3.3 的规定。

4.2.4.2.2 每年至少对标准试块及对比试块的表面腐蚀与机械损伤进行一次核查，按 JB/T 8428 的要求进行。

4.2.4.3 运行核查

4.2.4.3.1 每隔 6 个月至少对仪器和探头组合性能中的水平线性和垂直线性进行一次运行核查并记录，测试要求应满足 4.2.1.3.3 的规定。

4.2.4.3.2 在合适的检测设置下采用本部分规定的对比试块进行检测时，设备能够清楚的显示和测量其中的反射体，每隔 6 个月至少进行一次测定和记录。

#### 4.2.4.4 检查

4.2.4.4.1 每次检测前应测定和记录探头前沿、超声波在探头楔块中的传播时间及-12dB 声束扩散角（仪器和探头组合的-12dB 声束扩散角测定方法见 NB/T47013.10-2015 附录 C）。

4.2.4.4.2 每次检测前应对位置传感器进行检查和记录，检查方式是使带位置传感器的扫查装置至少移动 500mm，将检测设备所显示的位移与实际位移进行比较，其误差应小于 1%。

### 4.3 TOFD 检测技术要求

TOFD 检测技术要求见表 4-1。

表 4-1 TOFD 检测技术要求

| 检测面 | 扫查面盲区 <sup>a</sup> | 底面盲区 <sup>b</sup> | 横向缺陷检测 | 采用模拟试块验证工艺      | 扫查面表面检测 | 扫查面及底面表面检测 |
|-----|--------------------|-------------------|--------|-----------------|---------|------------|
| 单面  | ≤1mm               | ≤1mm              | 需要     | 需要 <sup>c</sup> | 需要      | 需要         |

注 1:为使扫查面盲区高度或底面盲区≤1mm，可选择的检测工艺或方法建议如下：  
 当初始扫查面盲区高度  $h_5 > 1\text{mm}$  时，宜采用脉冲反射法超声检测；  
 当初始底面盲区高度  $h_4 > 1\text{mm}$  时，宜采用偏置平行扫查；  
 注 2:对于加钒钢采用 SAW 焊接方式的环向对接接头，需采用 TOFD 平行扫查的方式检测横向缺陷；其他可按照 NB/T47013.3 中承压设备对接接头 C 级检测技术等级的要求进行横向缺陷的超声检测，但应采用图 4-8 试块进行灵敏度验证。  
 注 3:若因工件结构因素存在 TOFD 检测不可达区域，应辅以射线或相控阵超声等具备可记录的检测方法对不可达区域进行补充，并在报告中注明。  
 注 4:表面检测方法包括磁粉检测、渗透检测或涡流检测，优先采用磁粉检测。  
 注 5:射线检测、脉冲反射法超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测应按照 NB/T47013.2~47013.6 规定的要求进行，相控阵超声检测应按照 NB/T47013.15 规定的要求进行。

a 检测区域内的扫查面盲区，应采用图 4-6 规定的扫查面盲区高度试块或采用对比试块不同深度的表面槽进行测量。  
 b 检测区域内的底面盲区。  
 c 采用 4.2.3.3 规定的模拟试块按 4.4.4.2 要求进行。

#### 4.4 检测工艺文件

4.4.1 检测工艺文件包括工艺规程和操作指导书。

4.4.2 工艺规程除满足 NB/T 47013.1 的要求外，还应规定表 4-2 中所列相关因素的具体范围或要求；如相关因素的变化超出规定时，应重新编制或修订工艺规程。

表 4-2 检测工艺规程涉及的相关因素

| 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标准、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  | 横向缺陷检测方式及工艺试验报告           |
| 7  | 盲区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  |

4.4.3 应根据工艺规程的内容以及被检工件的检测要求编制操作指导书，其内容除满足 NB/T 47013.1 的要求外，至少还应包括：

- a) 检测技术要求：执行标准、合格级别、检测时机、检测比例和检测前的表面准备要求；
- b) 检测设备器材（包括仪器、探头、扫查装置、耦合剂、试块名称和规格型号，性能检查的项目、时机和性能指标）；
- c) 检测工艺参数（包括扫查面的选择；探头参数及布置；仪器的设置如灵敏度设置、扫查步进、脉冲重复频率、信号平均等；厚度分区及各分区覆盖范围；初始表面盲区高度及其检测方法；扫查方式；扫查速度；横向缺陷的检测方法等）；
- d) 检测标识规定；
- e) 检测操作程序和扫查次序；
- f) 检测记录和数据评定的具体要求。

4.4.4 操作指导书的工艺验证

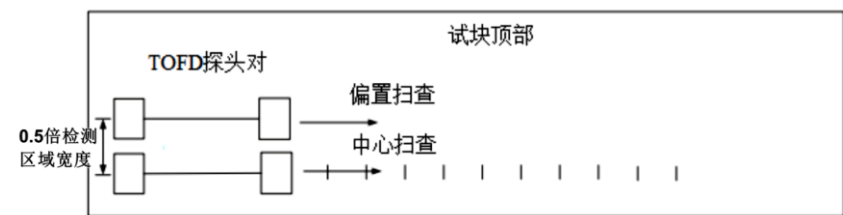
4.4.4.1 操作指导书在首次应用前应进行工艺验证。

4.4.4.2 非平行扫查应选取 4.2.3.3 要求的模拟试块进行验证，验证的具体方式和要求如下：

- a) 按操作指导书对相应的模拟试块进行 TOFD 检测；
- b) TOFD 图像应能够清楚的显示模拟试块中所有的模拟缺陷；
- c) 测量的模拟缺陷尺寸应尽量接近其实际尺寸。

4.4.4.3 平行扫查（平行焊缝）应选取 4.2.3.4 要求的横向再热裂纹灵敏度验证试块进行验证,TOFD 检测工艺验证的具体方式和要求如下：

- a) 按操作指导书将相应检测区域探头分别置于横向再热裂纹灵敏度验证试块上进行平行扫查；中心扫查需将探头对沿 EDM 槽中心进行放置，偏置扫查将探头对放置在偏移 EDM 槽中心约检测区域宽度的一半进行扫查，如图 4-9 所示；
- b) 两次 TOFD 扫查图像应能够清晰的发现各探头对所覆盖分区范围内的所有 EDM 槽，若偏置扫查不能有效发现覆盖分区范围内的所有 EDM 槽，应增加偏置扫查；
- c) 测量的缺陷高度尺寸应尽量接近其实际尺寸。



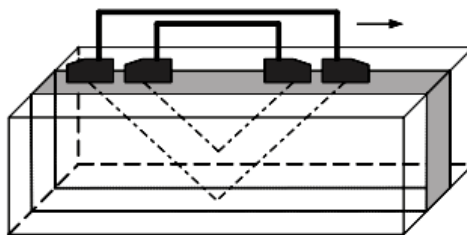


图 4.9 横向再热裂纹扫查示意

#### 4.4.4.4 堆焊层侧检测可行性验证

- a) 在基材侧受限的情况，需从堆焊层侧进行 TOFD 检测时，应进行检测能力可行性验证。
- b) 需制作专用对比试块，对比试块堆焊层的焊接工艺、厚度、表面状态应与被检工件基本一致，对比试块样式参考 4.2.3.2.5。
- c) 在专用对比试块堆焊层侧按 5.11 的要求进行灵敏度设置。

#### 4.5 检测程序

- a) 根据工艺规程和检测对象的检测要求编制操作指导书；
- b) 选择和确定检测工艺参数；
- c) 工艺验证；
- d) 被检测工件准备；
- e) 检测系统性能检查；
- f) 检测；
- g) 检测系统复核；
- h) 数据评定；
- i) 检测记录；
- j) 检测报告。

#### 4.6 温度

4.6.1 应确保在规定的温度范围内进行检测；采用常规探头和耦合剂时，被检工件的表面温度范围应控制在  $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ；超出该温度范围，可采用特殊探头和耦合剂。

4.6.2 若温度过低或过高，一般应采取有效措施避免。若无法避免，应评价其对检测结果的影响。

4.6.3 检测系统设置和校准时的温度与实际检测温度之差应控制在  $20^{\circ}\text{C}$  之内。

#### 4.7 安全要求

4.7.1 应满足 NB/T 47013.1-2015 中 6.3 相关规定的要求。

4.7.2 应考虑可能的漏电等因素，并采取必要的保护措施。

### 5 检测工艺参数的选择和设置

#### 5.1 检测区域的确定

5.1.1 检测区域由其高度和宽度表征。

5.1.1.1 检测区域高度为工件焊接接头的厚度。

5.1.1.2 检测区域宽度为焊缝本身及焊缝熔合线两侧各 10mm。

5.1.2 若对于已发现缺陷部位进行复检或已确定的重点部位，检测区域可缩减至相应部位。

## 5.2 探头选取和设置

5.2.1 探头选取包括探头型式、参数的选择。一般选择宽角度纵波斜探头，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。

5.2.2 当工件厚度  $t \leq 50\text{mm}$  时，可采用一组探头对检测，推荐将探头中心间距设置为使该探头对的声束交点位于  $2/3t$  深度处。

5.2.3 当工件厚度  $t > 50\text{mm}$  时，应在厚度方向分成若干不同的深度范围，采用不同参数的探头对分别进行检测；推荐将探头中心间距设置为使每一组探头对的声束交点位于其所检测深度范围的  $2/3$  处；该探头有效声束在所检测深度范围内相对声束轴线处的声压幅值下降不应超过 12dB。

5.2.4 检测工件底面的探头声束与底面检测区域边界处法线间的夹角一般应不小于  $40^\circ$ 。

5.2.5 与平板工件或较大直径工件厚度有关的检测分区、探头选取和设置可参考表 5-1。

表 5-1 平板对接接头的探头推荐性选择和设置

| 工件厚度 mm           | 厚度分区数 | 深度范围 mm          | 标称频率 MHz | 声束角度 (°) | 晶片直径 mm |
|-------------------|-------|------------------|----------|----------|---------|
| $\geq 12 \sim 15$ | 1     | $0 \sim t$       | 15~7     | 70~60    | 2~4     |
| $> 15 \sim 35$    | 1     | $0 \sim t$       | 10~5     | 70~60    | 2~6     |
| $> 35 \sim 50$    | 1     | $0 \sim t$       | 5~3      | 70~60    | 3~6     |
| $> 50 \sim 100$   | 2     | $0 \sim 2t/5$    | 7.5~5    | 70~60    | 3~6     |
|                   |       | $2t/5 \sim t$    | 5~3      | 60~45    | 6~12    |
| $> 100 \sim 200$  | 3     | $0 \sim t/5$     | 7.5~5    | 70~60    | 3~6     |
|                   |       | $t/5 \sim 3t/5$  | 5~3      | 60~45    | 6~12    |
|                   |       | $3t/5 \sim t$    | 5~2      | 60~45    | 6~20    |
| $> 200 \sim 300$  | 4     | $0 \sim 40$      | 7.5~5    | 70~60    | 3~6     |
|                   |       | $40 \sim 2t/5$   | 5~3      | 60~45    | 6~12    |
|                   |       | $2t/5 \sim 3t/4$ | 5~2      | 60~45    | 6~20    |
|                   |       | $3t/4 \sim t$    | 3~1      | 50~40    | 10~20   |
| $> 300 \sim 400$  | 5     | $0 \sim 40$      | 7.5~5    | 70~60    | 3~6     |
|                   |       | $40 \sim 3t/10$  | 5~3      | 60~45    | 6~12    |
|                   |       | $3t/10 \sim t/2$ | 5~2      | 60~45    | 6~20    |
|                   |       | $t/2 \sim 3t/4$  | 3~1      | 50~40    | 10~20   |

|                 |   |                   |              |              |              |
|-----------------|---|-------------------|--------------|--------------|--------------|
|                 |   | $3t/4 \sim t$     | $3 \sim 1$   | $50 \sim 40$ | $12 \sim 25$ |
| $>400 \sim 500$ | 6 | $0 \sim 40$       | $7.5 \sim 5$ | $70 \sim 60$ | $3 \sim 6$   |
|                 |   | $40 \sim 6t/25$   | $5 \sim 3$   | $60 \sim 45$ | $6 \sim 12$  |
|                 |   | $6t/25 \sim 2t/5$ | $5 \sim 2$   | $60 \sim 45$ | $6 \sim 20$  |
|                 |   | $2t/5 \sim 3t/5$  | $3 \sim 1$   | $50 \sim 40$ | $10 \sim 20$ |
|                 |   | $3t/5 \sim 4t/5$  | $3 \sim 1$   | $50 \sim 40$ | $12 \sim 25$ |
|                 |   | $4t/5 \sim t$     | $3 \sim 1$   | $50 \sim 40$ | $12 \sim 30$ |

5.2.6 若已知缺陷的大致位置或仅检测可能产生缺陷的部位，可选择相匹配的探头型式（如聚焦探头）或探头参数（如频率、晶片直径），将探头中心间距设置为使探头对的声束交点为缺陷部位或可能产生缺陷的部位，且声束角度  $\alpha$  为  $55^\circ \sim 60^\circ$ 。

### 5.3 扫查面和扫查方式的选择

5.3.1 一般情况下环向焊接接头应选择筒体外表面作为扫查面，在内壁没有覆层时，也可选择内壁进行扫查；弧面和非平面对接接头的扫查面选择应考虑盲区高度的大小，如纵向焊接接头在内壁没有覆层时，为减少检测盲区的影响，应选择内壁进行扫查；扫查面的选择还应考虑有足够的操作实施空间。

5.3.2 初始扫查方式一般分为非平行扫查、偏置非平行扫查、平行扫查、偏置平行扫查和斜平行扫查。

5.3.3 一般采用非平行扫查作为基本扫查方式，用于缺陷的快速探测以及缺陷长度、缺陷自身高度的测定，可大致测定缺陷深度。

5.3.4 当非平行扫查的初始底面盲区高度较大或探头声束不能有效覆盖检测区域时，可对相应检测区域增加偏置非平行扫查。探头声束对检测区域的覆盖有效性，可采用在对比试块上增加一次偏置检测区域宽度的一半，扫查后查看数据图像中各分区内的横孔是否均可有效发现来证明。

5.3.5 在满足检测目的的前提下，根据需要的不同，也可采用其他适合的扫查方式。

5.3.6 在采用多种初始扫查方式时，应合理安排扫查次序并在操作指导书中注明。

### 5.4 确定初始扫查面盲区高度和检测方式

#### 5.4.1 初始扫查面盲区高度

5.4.1.1 初始扫查面盲区高度的确定应采用实测法。

5.4.1.2 应采用图 4-6 规定的扫查面盲区高度试块或采用对比试块不同深度的表面槽进行测量。将设置好的扫查装置分别对不同深度侧孔或槽进行扫查，能发现的最小深度横孔上沿或槽底面对应的深度即为初始扫查面盲区高度。

#### 5.4.2 扫查面盲区检测方式

5.4.2.1 可参照 4.3 选择扫查面盲区检测方式。

5.4.2.2 若选用脉冲反射法的爬波法，应在工艺中明确爬波探头的规格型号和布置方式。

5.5 确定初始底面盲区高度和检测方式

5.5.1 初始底面盲区高度按式（1）计算：

$$\Delta h = t \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{s^2 + t^2}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$t$  ——工件厚度；

$x$  ——偏离焊缝中心线的距离（此处为底面检测区域宽度的一半）；

$s$  ——探头中心间距的一半。

5.5.2 底面盲区检测方式

5.5.2.1 可参照 4.3 选择底面盲区检测方式。

5.5.2.2 若选用偏置非平行扫查方式时，应在工艺中明确偏置方向、偏置量及偏置后的底面盲区高度（可参考式（1）计算）。

5.6 横向缺陷的检测方式

5.6.1 可参照 4.3 选择横向缺陷检测方式。

5.6.2 若选用斜平行扫查方式时，应在工艺中明确斜向扫查角度、探头选取和设置等。

5.7 扫查步进设置

5.7.1 扫查步进是指扫查过程中相邻两个 A 扫描信号间沿工件扫查路径的空间间隔。检测前应将检测设备设置为根据扫查步进采集信号。

5.7.2 扫查步进值设置主要与工件厚度有关，按表 5-2 的规定进行设置。

表 5-2 扫查步进值的设置 单位为 mm

| 工件厚度 $t$             | 扫查步进最大值 $\Delta x_{\max}$ |
|----------------------|---------------------------|
| $12 \leq t \leq 150$ | 1.0                       |
| $t > 150$            | 2.0                       |

5.8 信号平均化处理

5.8.1 信号平均化处理有利于降低随机噪声的影响，从而提高信噪比。

5.8.2 检测前应合理设置检测通道的信号平均化处理次数  $N$ ，一般情况下设定为 1，噪声较大时设定值不应大于 16。

## 5.9 设置仪器其他参数

5.9.1 根据所选择探头，设置数字化频率至少为所选择探头最高标称频率的 6 倍。

5.9.2 根据所选择探头，设置接收电路的频率响应范围至少为所选探头标称频率 0.5 倍~1.5 倍。

5.9.3 设置脉冲重复频率，应与数据采集速度和可能的最大扫查速度相称。

## 5.10 A 扫描时间窗口设置和深度校准

5.10.1 检测前应对检测通道的 A 扫描时间窗口进行设置。

5.10.2 若工件厚度不大于 50mm 且采用单检测通道时，其时间窗口的起始位置应设置为直通波到达接收探头前  $0.5\mu\text{s}$  以上，时间窗口的终止位置应设置为工件底面的一次波型转换波后  $0.5\mu\text{s}$  以上；同时将直通波与底面反射波时间间隔所反映的厚度校准为已知的工件厚度值。

5.10.3 若在厚度方向分区检测时，应采用 4.2.3 规定的对比试块设置各检测通道的 A 扫描时间窗口和进行深度校准，A 扫描时间窗口至少应包含所需检测的深度范围，同时应满足如下要求：

- a) 首先根据已知的对比试块内的各侧孔实际深度校准检测设备的深度显示；
- b) 最上分区的时间窗口的起始位置应设置为直通波到达接收探头前  $0.5\mu\text{s}$  以上，时间窗口的终止位置应设置为不小于所检测深度范围的最大值；
- c) 其他分区的有效时间窗口的起始位置应在厚度方向依次向上覆盖相邻检测分区深度范围的 25%；
- d) 最下分区的时间窗口的终止位置应设置为底面反射波到达接收探头后  $0.5\mu\text{s}$  以上；
- e) 可利用检测设备经对比试块校核后的深度参数输入。
- f) 针对中间各分区通道设定实际时间窗口时，应至少涵盖直通波或底面反射波中的一种，以便于判别该通道在检测期间的工作状态；在缺陷评定时，可参照 c) 规定的有效时间窗口，选取对应区域展开评定。

## 5.11 检测灵敏度设置

5.11.1 检测前应设置检测通道的灵敏度。

5.11.2 应采用 4.2.3.2 规定的对比试块设置各通道检测灵敏度。将各通道 A 扫描时间窗口内各反射体产生的衍射信号中最弱的波幅设置为满屏高的 40%~80% 作为灵敏度（最上分区也可将直通道的波幅设定到满屏高的 40%~80%）。

5.11.3 信噪比应不低于 8dB。

## 5.12 检测系统总体设置的确认

5.12.1 各项检测工艺参数设置均完成后，应在对比试块上作实际扫查，该检测数据应保存在检测记录中。

5.12.2 若检测工艺参数不适合，应作必要的调整，调整后应按 5.11 重新设置灵敏度。

## 6 检测

### 6.1 检测时机

若无其他规定，TOFD 应在 PWHT 前进行。横向再热裂纹检测一般在首次经历大于 620℃ 热处理后进行。

### 6.2 扫查面准备

6.2.1 探头移动区应清除焊接飞溅、铁屑、油垢及其他杂质，一般应进行打磨。探头移动区表面应平整，便于探头的扫查，其表面粗糙度 Ra 值应不低于 12.5μm。

6.2.2 承压筒体 Cr-Mo 钢焊接接头应去除余高，打磨到与邻近母材平齐；对于需保留余高的裙座环、纵焊接接头等，如果焊接接头表面存在咬边、较大隆起和凹陷等应进行适当的修磨，并作圆滑过渡以免影响检测结果的评定。

6.2.3 检测前应在被检工件扫查面上予以标记划线，至少划出焊缝中心线；标记内容至少包括扫查起始点、扫查方向及区段编号，同时推荐在母材上距焊缝中心线规定的距离处画出一条线，作为扫查装置运动的参考。划线宜选择不易被耦合剂冲洗掉且颜色明显的工具。

### 6.3 母材检测

6.3.1 对重要工件或检测人员有怀疑时，应对超声波声束通过的母材区域按 NB/T 47013.3 中的有关规定，采用直探头进行检测或在 TOFD 检测的过程中进行。

6.3.2 母材中影响检测结果的反射体，应予以记录。

6.3.3 以堆焊层侧作为扫查面的，应先对 TOFD 探头声束所通过的堆焊层区域用双晶直探头按 NB/T 47013.3 的规定进行检测，不得有大于或等于  $\phi 2\text{mm}$  平底孔当量直径的缺陷。

### 6.4 耦合剂

实际检测采用的耦合剂应与检测系统设置和校准时的耦合剂相同。从覆层侧扫查使用的耦合剂应满足相关有害元素含量限制的要求。

### 6.5 检测前工艺参数调节

6.5.1 灵敏度设置应采用对比试块，在实际工件检测前应进行表面耦合补偿，表面耦合补偿量的确定可参照 NB/T 47013.3 的有关内容。

6.5.2 若 A 扫描时间窗口设置和深度校准是采用对比试块，则应在实际工件上检查深度显示，确保深度显示偏差不大于工件厚度的 3%或 2mm（取较大值），否则应进行必要的调节。

6.5.3 对于曲面或其他非平面工件的纵向焊接接头，应对深度显示进行必要的调节。

## 6.6 扫查

6.6.1 应保证实际扫查路径与拟扫查路径的偏差不超过探头中心间距的 10%且不大于 10mm。

6.6.2 扫查时应保证扫查速度小于或等于最大扫查速度  $v_{\max}$ ，向时应保证耦合效果和满足数据采集的要求。

最大扫查速度按式（2）计算：

$$v_{\max} = \frac{PRF}{N} \Delta x \dots\dots\dots (2)$$

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；

$\Delta x$ ——设置的扫查步进值，mm；

$N$ ——设置的信号平均化处理次数。

6.6.3 每次扫查长度不应超过 2000mm；若需对焊缝在长度方向进行分段扫查，则各段扫查区的重叠范围至少为 20mm；对于环焊缝，扫查停止位置应越过起始位置至少 20mm。

6.6.4 扫查过程中应密切注意波幅状况，若发现直通波、底面反射波、材料晶粒噪声或波型转换波的波幅降低 12dB 以上或怀疑耦合不好或有 A 扫描信号的连续丢失时，应重新扫查整段区域；若发现直通波满屏或晶粒噪声波幅超过满屏高 20%时，则应降低增益并重新扫查。

## 6.7 检测数据记录

每一次的检测数据应按照工艺文件的要求进行编号储存。

## 6.8 检测系统复核

6.8.1 在如下情况时应进行复核：

- a) 检测过程中检测设备开停机或更换部件时；
- b) 检测人员有怀疑时；
- c) 检测结束时。

6.8.2 在复核时应采用与初始检测工艺设置时使用的对比试块一致。

6.8.3 若复核时发现初始设置的参数偏离（应消除按 6.5 进行调节产生的影响），按表 6-1 的规定执行。

表 6-1 偏差和纠正

|     |                                       |                         |
|-----|---------------------------------------|-------------------------|
| 灵敏度 | $\leq 6\text{dB}$                     | 不需要采取措施，必要时可通过软件纠正      |
|     | $> 6\text{dB}$                        | 应重新设置，并重新检测上次校准以来所检测的焊缝 |
| 深度  | 偏离 $\leq 2\text{mm}$ 或板厚的 3%<br>(取大值) | 不需要采取措施                 |
|     | 偏离 $> 2\text{mm}$ 或板厚的 3%             | 应重新设置，并重新检测上次设置以来所检测的焊缝 |
| 位移  | $\leq 5\%$                            | 不需要采取措施                 |
|     | $> 5\%$                               | 应对上次设置以来所检测的位置进行修正      |

## 7 检测数据的分析和解释

### 7.1 检测数据的有效性评价

7.1.1 分析数据前应对所采集的数据进行评估以确定其有效性，检测数据至少应满足如下要求：

- a) A 扫描时间窗口设置符合 5.10 的要求；
- b) 采集的数据量满足所检测焊缝长度的要求；
- c) 每一检测数据中的 A 扫描信号丢失量不得超过总量的 5%，且相邻 A 扫描信号连续丢失长度不超过表 5-2 规定的扫查步进最大值的两倍；缺陷部位的 A 扫描信号丢失不得影响缺陷的评定；
- d) 信号波幅改变量及信号连续性满足 6.6.4 的规定；
- e) 直通波、底面反射波无明显非缺陷引起的突变且较为平直。

7.1.2 对于无效数据，应重新进行检测。

### 7.2 相关显示和非相关显示

#### 7.2.1 相关显示

7.2.1.1 相关显示分为表面开口型缺陷显示和埋藏型缺陷显示。

#### 7.2.1.2 表面开口型缺陷显示

7.2.1.2.1 表面开口型缺陷显示可细分为如下三类：

- a) 扫查面开口型：该类型通常显示为直通波的减弱、消失或变形，仅可观察到一个端点（缺陷下端点）产生的衍射信号，且与直通波同相位；
- b) 底面开口型：该类型通常显示为底面反射波的减弱、消失、延迟或变形，仅可观察到一个端点（缺陷上端点）产生的衍射信号，且与直通波反相位；
- c) 穿透型：该类型显示为直通波和底面反射波同时减弱或消失，可沿壁厚方向产生多处衍射信号。

7.2.1.2.2 数据分析时，应注意与直通波和底面反射波最近的缺陷信号的相位，初步判断缺陷的上、下端点是否隐藏于表面盲区或在工件表面。

#### 7.2.1.3 埋藏型缺陷显示

#### 7.2.1.3.1 埋藏型缺陷显示可细分为如下三类：

- a) 点状显示：该类型显示为双曲线弧状，旦与拟合弧形光标重合，无可测量长度；
- b) 线状显示：该类型显示为细长状，无可测量高度；
- c) 条状显示：该类型显示为长条状，可见上、下两端产生的衍射信号。

#### 7.2.1.3.2 埋藏型缺陷显示一般不影响直通波或底面反射波的信号。

#### 7.2.2 非相关显示

由于工件的外形结构或材料冶金等非缺陷引起的显示。

#### 7.2.3 相关显示和非相关显示的记录和测定

- a) 对于表面开口型缺陷显示、线状和条状埋藏型缺陷显示，至少应测定缺陷的位置、缺陷长度、缺陷深度以及缺陷自身高度，必要时还应测定缺陷偏离焊缝中心线的位置；
- b) 对于埋藏型点状显示，当某区域内数量较多时，应予以记录；
- c) 对于非相关显示，应记录其位置。

#### 7.2.4 必要时，对已发现的相关显示，为获得更多信息，可增加平行扫查。

### 7.3 缺陷的位置及缺陷长度测定

#### 7.3.1 缺陷的位置

##### 7.3.1.1 根据非平行扫查或偏置非平行扫查得到的 TOFD 图像确定缺陷在 X 轴的位置。

##### 7.3.1.2 一般使用拟合弧形光标法确定缺陷沿 X 轴方向的前、后端点位置：

- a) 对于点状显示，可采用拟合弧形光标与相关显示重合时所代表的焊缝方向上位置数值；
- b) 对于其他显示，应分别测定其前、后端点位置。可采用拟合弧形光标与相关显示端点重合时所显示的焊缝方向上位置数值。

##### 7.3.1.3 可采用聚焦探头改善缺陷位置的测定精度。

##### 7.3.2 缺陷长度根据缺陷前、后端点在 X 轴的位置计算而得，见图 7-1、图 7-2 中 $l$ 。

### 7.4 缺陷深度测定

#### 7.4.1 表面开口型缺陷显示：

- a) 扫查面开口型和穿透型：缺陷深度为 0；
- b) 底面开口型：缺陷上端点与扫查面间的距离为缺陷深度。

#### 7.4.2 埋藏型缺陷显示：

- a) 点状显示：采用拟合弧形光标与点状显示重合时所显示的深度值；
- b) 线状显示和条状显示：其上端点与扫查面间的距离为缺陷深度。

#### 7.4.3 在平行扫查的 TOFD 显示中，缺陷距扫查面最近处的上端点所反映的深度为缺陷深度的

精确值。

### 7.5 缺陷自身高度测定

7.5.1 对于表面开口型缺陷显示：缺陷自身高度为表面与缺陷上（或下）端点间最大距离，见图 7-2 中  $h$ ；若为穿透型，缺陷自身高度为工件厚度。

7.5.2 对于埋藏型条状缺陷显示，缺陷自身高度见图 7-1 中  $h$ 。

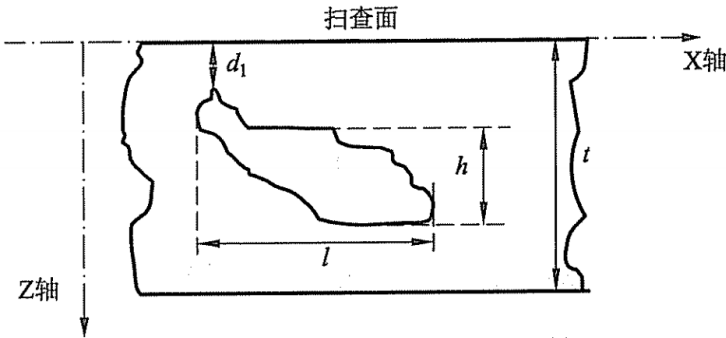


图 7-1 埋藏型缺陷长度  $l$ 、缺陷深度  $d_1$  和缺陷自身高度  $h$

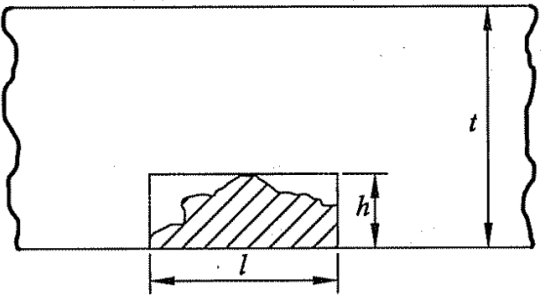


图 7-2 表面开口型缺陷尺寸

说明：

$h$ ——表面缺陷自身高度；

$l$ ——表面缺陷长度；

$t$ ——工件厚度。

### 7.6 缺陷偏离焊缝中心线位置的测定

7.6.1 在非平行扫查和偏置非平行指查得到的 TOFD 图像中，无法确定缺陷偏离焊缝中心线的距离，应采用脉冲反射法超声检测或其他有效方法进行测定。

7.6.2 在沿垂直焊缝方向进行平行扫查得到的 TOFD 图像中，缺陷上端点距扫查面最近处所反映的 Y 轴位置为缺陷偏离焊缝中心线的位置。

### 7.7 沿焊缝方向进行平行扫查 TOFD 图像的缺陷深度、高度、长度及偏离中心线测定

7.7.1 缺陷深度应按其显示的中心顶点对应的深度值测定（见图 7-3 中  $H$ ）。

7.7.2 缺陷高度宜采用其上下端点显示的中心顶点对应高度值的差值测量，以保证数据准确性（见图 7-3 中 A）。

7.7.3 因 TOFD 平行扫查的成像特性，缺陷显示易出现拉长畸变。当进行平行扫查（平行焊缝）时，沿焊缝纵向分布（X 轴方向）的缺陷应按第 7.3 条规定测量缺陷长度；沿焊缝横向分布的缺陷（Y 轴方向）的缺陷长度应通过平行扫查（垂直焊缝）方向补充扫查后按第 7.3 条规定测量长度。

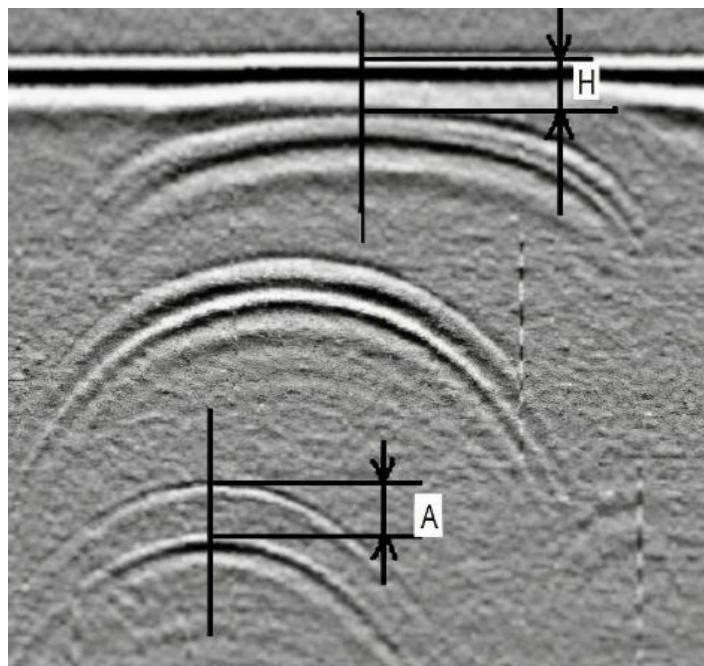


图 7-3 平行扫查图像

## 8 非平行扫查缺陷的评定、质量分级及验收

8.1 相邻两个或多个缺陷显示（非点状），其在 X 轴方向间距小于其中较小的缺陷长度且在 Z 轴方向前距小于其中较小的缺陷自身高度时，应作为一条缺陷处理，该缺陷深度、缺陷长度及缺陷自身高度按如下原则确定：

- a) 缺陷深度：以两缺陷深度较小值作为单个缺陷深度；
- b) 缺陷长度：两缺陷在 X 轴投影上的前、后端点间距离；
- c) 缺陷自身高度：若两缺陷在 X 轴投影无重叠，以其中较大的缺陷自身高度作为单个缺陷自身高度；若两缺陷在 X 轴投影有重叠，则以两缺陷自身高度之和作为单个缺陷自身高度（间距计入）。

8.2 不允许危害性表面开口缺陷的存在。

8.3 如检测人员可判断缺陷类型为裂纹、坡口未熔合等危害性缺陷时，评为Ⅲ级。

8.4 点状显示的质量分级及验收要求如下：

8.4.1 点状显示用评定区进行质量分级评定，评定区为一个与焊缝平行的矩形截面，其沿 X 轴

方向的长度为 100mm，沿 Z 轴方向的高度为工件厚度。

8.4.2 在评定区内或与评定区边界线相切的缺陷均应划入评定区内，若无其他规定，按表 8-1 的规定评定焊接接头的质量级别 I 级进行验收。

表 8-1 各级别允许的点状显示的个数

| 等级  | 工件厚度 $t/\text{mm}$ | 个数                      |
|-----|--------------------|-------------------------|
| I   | 12~500             | $t \times 0.5$ ，最大为 130 |
| II  | 12~500             | $t \times 0.8$ ，最大为 200 |
| III | 12~500             | 超过 II 级者                |

8.4.3 对于密集型点状显示，按条状显示处理。

8.5 非点状缺陷显示的质量分级及验收要求如下：

若无其他规定，非点状缺陷显示的质量分级按表 8-2 规定的的质量分级I级验收。

表 8-2 焊接接头质量分级

单位为 mm

| 等级 | 工件厚度<br>$t^a$       | 单个缺陷               |             |                                  |                    |             |                                  | 单个或多个缺陷累积长度                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|---------------------|--------------------|-------------|----------------------------------|--------------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                     | 表面开口缺陷             |             |                                  | 埋藏型缺陷              |             |                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    |                     | 长度<br>$l_{\max}$   | 高度<br>$h_3$ | 若 $l > l_{\max}$ , 缺陷高度<br>$h_1$ | 长度<br>$l_{\max}$   | 高度<br>$h_2$ | 若 $l > l_{\max}$ , 缺陷高度<br>$h_1$ |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| I  | $12 \leq t \leq 15$ | $\leq \frac{t}{2}$ | $\leq 2$    | $\leq 1$                         | $\leq \frac{t}{2}$ | $\leq 3$    | $\leq 1$                         | 1、对于单个或多个 $h \leq h_1$ 的线状缺陷, 在任意 $12t$ 范围内累计长度不得超过 $4t$ 且最大值为 $200\text{mm}$ ;<br>2、若多个缺陷其各自长度 $l \leq l_{\max}$ 、高度 $h$ 均为: $h \leq h_2$ 或 $h_3$ , 则在任意 $12t$ 范围内累计长度不得超过 $3t$ 且最大值为 $150\text{mm}$ ;<br>3、所有表面开口缺陷累计长度不得大于整条焊缝长度的 $5\%$ 且最长不得超过 $300\text{mm}$ |
|    | $15 < t \leq 40$    | $\leq \frac{t}{2}$ | $\leq 2$    | $\leq 1$                         | $\leq \frac{t}{2}$ | $\leq 4$    | $\leq 1$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | $40 < t \leq 60$    | $\leq 20$          | $\leq 3$    | $\leq 2$                         | $\leq 20$          | $\leq 5$    | $\leq 2$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | $60 < t \leq 100$   | $\leq 25$          | $\leq 3$    | $\leq 2$                         | $\leq 25$          | $\leq 5$    | $\leq 2$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | $t > 100$           | $\leq 30$          | $\leq 4$    | $\leq 3$                         | $\leq 30$          | $\leq 6$    | $\leq 3$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| II | $12 \leq t \leq 15$ | $\leq t$           | $\leq 2$    | $\leq 1$                         | $\leq t$           | $\leq 3$    | $\leq 1$                         | 1、对于单个或多个 $h \leq h_1$ 的线状缺陷, 在任意 $12t$ 范围内累计长度不得超过 $5t$ 且最大值为 $300\text{mm}$ ;<br>2、若多个缺陷其各自长度 $l \leq l_{\max}$ 、高度 $h$ 均为: $h \leq h_2$ 或                                                                                                                      |
|    | $15 < t \leq 40$    | $\leq t$           | $\leq 2$    | $\leq 1$                         | $\leq t$           | $\leq 4$    | $\leq 1$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | $40 < t \leq 60$    | $\leq 40$          | $\leq 3$    | $\leq 2$                         | $\leq 40$          | $\leq 5$    | $\leq 2$                         |                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                                        |                   |           |          |          |           |          |          |                                                                                                                    |
|----------------------------------------|-------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        | $60 < t \leq 100$ | $\leq 50$ | $\leq 3$ | $\leq 2$ | $\leq 50$ | $\leq 5$ | $\leq 2$ | $h_3$ , 则在任意 $12t$ 范围内累计长度不得超过 $4t$ 且最大值为 $200\text{mm}$ ;<br>3、所有表面开口缺陷累计长度不得大于整条焊缝长度的 10% 且最长不得超过 $500\text{mm}$ |
|                                        | $t > 100$         | $\leq 60$ | $\leq 4$ | $\leq 3$ | $\leq 60$ | $\leq 6$ | $\leq 3$ |                                                                                                                    |
| III                                    | 12~400            | 超过II级者    |          |          |           |          |          |                                                                                                                    |
| <sup>a</sup> 公称厚度；当焊缝两侧母材公称和厚度不同时，取薄侧。 |                   |           |          |          |           |          |          |                                                                                                                    |

8.6 当各类缺陷评定的质量级别不同时，以质量级别最低的作为焊接接头的质量级别。

## 9 平行扫查（平行焊缝）横向再热裂纹的评定

9.1 点状显示：应采用人工脉冲反射超声检测方法进行检测，以确认性质。

9.2 密集型显示：若在同一厚度平面（ $\pm 2.5\text{mm}$ ）内观察到内观察到有三个显示（点状显示），且相距  $50\text{mm}$  或更小，则应将其视为再热裂纹，除非脉冲反射超声检测可以证明它们不平行且不是横向的。

9.3 线性显示：在底波信号附近及之上记录到的长度为  $50\text{mm}$  或更长的相位反转实心显示，可能是由底面附近的密集型再热裂纹引起，应通过近侧检测或其他超声检测方法进行检验。

9.4 TOFD 与人工脉冲反射法横波相结合检测横向再热裂纹的超声操作及评定方法，应按对应的团体标准中超声检测章节的规定执行。

## 10 检测记录和报告

10.1 应按照现场操作的实际情况详细记录检测过程的有关信息和数据。检测记录除符合 NB/T47013.1 的规定外，还至少应包括下列内容：

- a) 与被检工件有关的内容：名称、编号、规格、材质、坡口型式、焊接方法、热处理状况、检测部位及检测前的表面状态等；
- b) 检测设备器材：仪器型号及编号、探头型号和编号、扫查装置、试块、耦合剂等；
- c) 检测工艺参数：检测标准、检测操作指导书编号、检测面、检测区域、探头布置图、检测系统设置和核查的数值、扫查方式、温度；
- d) 检测示意图；
- e) 检测数据和分析：每一数据文件的名称及分析结果（包括其中需记录和测定的缺陷位置与尺寸、质量级别）；
- f) 检测系统总体设置确认的数据，还应包括模拟试块验证的数据与结果。

10.2 应依据检测记录出具检测报告。检测报告除符合 NB/T 47013.1 的规定外，还至少应包括：

- a) 委托单位；
- b) 与被检工件有关的内容：承压设备类别，检测对象的名称、编号、规格尺寸、材质、

坡口型式、焊接方法、热处理状况、检测部位和检测比例、检测时的表面状态、检测时机、温度等；

c) 检测设备器材：仪器和探头规格型号、扫查装置、耦合剂、试块（必要时）等；

d) 检测工艺参数：检测操作指导书编号、检测面、探头设置、扫查方式；

e) 检测结果和结论：数据文件名称，可记录缺陷的位置与尺寸、质量级别、数据文件名，检测结论。

## 附录 A

### 堆焊层层下母材裂纹检测

#### (资料性附录)

#### A.1 适用范围

A.1.1 本附录规定了热壁加氢反应器内壁大面积堆焊层层下母材裂纹的 TOFD 检测工艺要求、操作方法及缺陷确认规则。

A.1.2 本附录适用于基材为低碳钢或低合金钢、公称厚度 12mm~500mm 的热壁加氢反应器，其内壁大面积堆焊层层下母材区域的裂纹 TOFD 检测；不适用于堆焊层自身缺陷及堆焊层与母材未结合缺陷的检测。

#### A.2 一般要求

正文中关于检测人员资质、设备性能、通用工艺、安全要求等相关条款适用于本附录，同时还应满足本附录的相关要求。

#### A.3 探头选择和校准

3.1 堆焊层与母材界面下方 0~4mm 的母材区域为层下裂纹重点检测关注区域。

##### A.3.2 探头选择：

- a) 选用与母材厚度相匹配的一对 TOFD 纵波斜探头，探头标称频率、晶片尺寸及角度应符合表 A.1 要求；
- b) 探头对的标称频率、晶片尺寸应一致，脉冲持续时间（峰值回波降 20dB）不大于 2 周期；
- c) 优先选用聚焦探头，以提高层下区域检测分辨率。

表 A.1 堆焊层层下裂纹检测探头的推荐性选择和设置

| 工件厚度 mm  | 厚度分区数 | 主声束焦点深度<br>mm | 标称频率<br>MHz | 声束角度<br>(°) | 晶片直径<br>mm |
|----------|-------|---------------|-------------|-------------|------------|
| ≥12~15   | 1     | $t-4$         | 15~7        | 70~60       | 2~4        |
| >15~35   | 1     | $t-4$         | 10~5        | 70~60       | 2~6        |
| >35~50   | 1     | $t-4$         | 5~3         | 70~60       | 3~6        |
| >50~100  | 1     | $t-4$         | 5~3         | 60~45       | 6~12       |
| >100~200 | 1     | $t-4$         | 5~2         | 60~45       | 6~20       |
| >200~300 | 1     | $t-4$         | 3~1         | 50~40       | 10~20      |
| >300~400 | 1     | $t-4$         | 3~1         | 50~40       | 12~25      |
| >400~500 | 1     | $t-4$         | 3~1         | 50~40       | 12~30      |

##### A.3.3 校准要求：

- a) 选用 4.2.3.2.5 规定的对比试块（厚度应不小于工件公称厚度），试块中应包含与关注区域深度相当的横孔反射体深度；
- b) 调节检测系统增益，使对比试块中对应深度横孔的衍射波幅达到满屏高度（FSH）的 40%~

80%，且信噪比不低于 8dB，以此作为基准灵敏度；

c) 校准完成后，应在试块上进行验证，确保所有规定深度的人工缺陷均能清晰检出。

A.4 扫查方式

A.4.1 扫查方向：从基材侧沿堆焊方向进行扫查，TOFD 探头对应平行于堆焊方向，见图 A-1。

A.4.2 扫查范围：抽查焊接接头及两侧母材各 50mm 的区域进行划线扫查，划线扫查间隔应根据探头声束覆盖范围确定，不得超过声束有效覆盖宽度的 80%；当发现存在层下裂纹缺陷，应逐步增大划线范围，确定缺陷区域宽度，必要时可采用多通道分层扫查覆盖全厚度。

A.4.3 扫查装置应配备同步编码器，确保探头间距固定不变，扫查轴线与检测区域应保持一致。

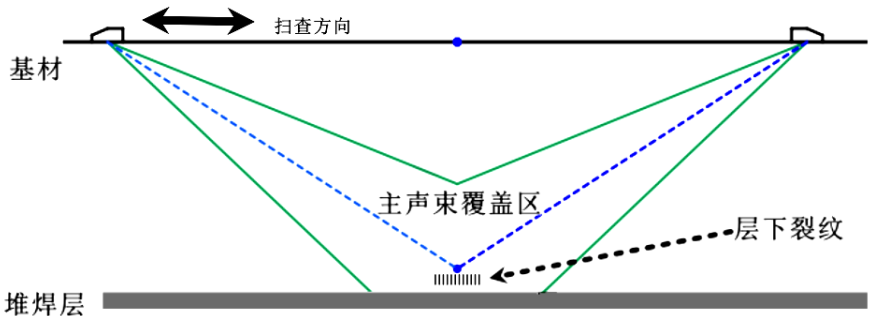


图 A-1 扫查示意图

A.5 层下裂纹的确认

A.5.1 初步判定：当检测发现堆焊层与母材界面下方 0mm~4mm 的区域内出现以下缺陷显示时，可初步判定为堆焊层层下裂纹：

- a) 存在明显的衍射信号显示，且幅值超过基准灵敏度对应的人工缺陷波幅的 20%，见图 A-2；
- b) 显示呈规律性分布，缺陷深度相近，多为连续或间断的呈集群状的点状显示；
- c) 缺陷显示的深度范围位于关注区域内，且排除堆焊层界面几何反射等非相关显示。

A.5.2 确认检测：对初步判定的疑似层下裂纹区域，应进行两次相互垂直方向的扫查。

A.5.3 辅助验证：对难以确认的缺陷，可采用脉冲反射法超声检测进行辅助验证，或结合磁粉检测、渗透检测排除表面延伸缺陷的干扰。

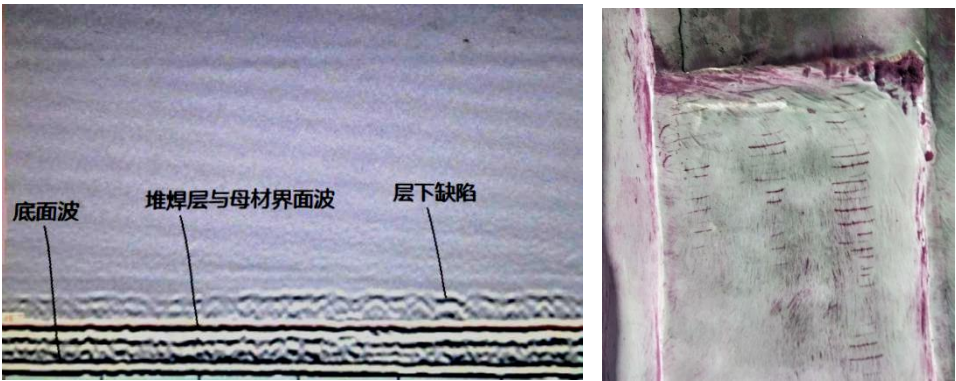


图 A-2 堆焊层层下裂纹图示

## 附录 B

容器过渡段与筒体、封头与过渡段对接接头 TOFD 检测方法  
(资料性附录)

## B.1 范围

本附录规定了容器过渡段与筒体、封头与过渡段对接接头衍射时差法 (TOFD) 检测的扫查方式、参数选择方法、有效区域宽度计算、偏置距离及偏置次数确定等技术要求。

## B.2 扫查方式

## B.2.1 一般要求

容器过渡段与筒体、封头与过渡段对接接头进行非平行扫查时, 因焊接接头坡口方向与 TOFD 扫查覆盖区域产生角度偏离, 如图 B-1、图 B-2, 为确保检测的完整性, 应补充偏置非平行扫查。

## B.2.2 补充偏置非平行扫查措施:

- 根据检测区域的宽度合理增设偏置扫查次数。
- 结合磁粉检测 (MT) 和超声波检测 (UT) 作为补充方法;
- 若工件外表面几何形状影响声束覆盖, 应增加筒体内壁的偏置非平行扫查。

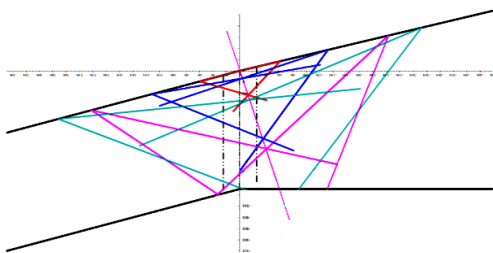


图 B.1 过渡段与筒体 TOFD 扫查覆盖偏离

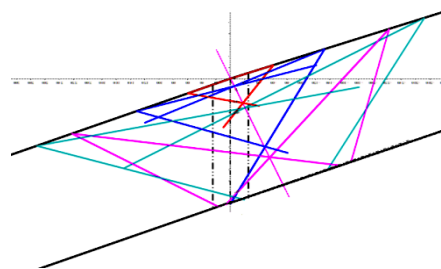


图 B.2 封头与过渡段 TOFD 扫查覆盖偏离

## B.3 参数选择

B.3.1 检测厚度通过对焊接接头及两侧母材临近 50mm 的范围进行测厚, 取测厚结果中的最大值作为检测参数的设定依据, 检测参数应依据表 5-1 进行选取。

B.3.2 检测区域宽度通过对焊接接头在 TOFD 扫查面上的投影长度计算。

## B.3.2 每组探头有效区域宽度的计算

B.3.2.1 TOFD 检测的有效区域为探头对 -12dB 扩散角组成的菱形区 (见图 B.3), 相邻通道有效覆盖区域宽度为前后相邻两组通道的菱形区叠加覆盖宽度 (见图 B.4), 且下扩散角应  $\geq 40^\circ$ 。

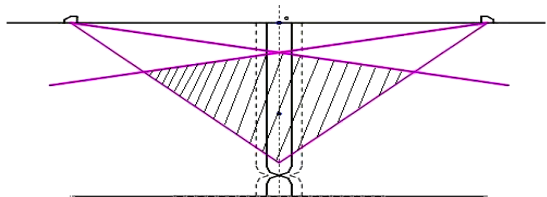


图 B.3 -12dB 扩散角组成的菱形区

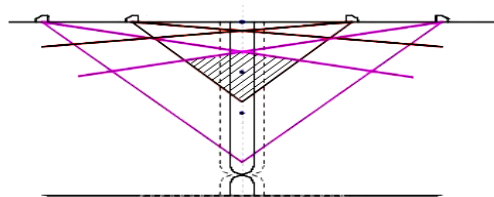


图 B.4 相邻通道有效覆盖区域宽度

## B.3.2.2 相邻通道有效覆盖区域宽度的计算

(1)根据选用的探头参数，计算-12dB 上、下扩散角角度所涉及到的公式如下：

a.楔块中纵波入射角度  $\theta_p = \arcsin(\sin \theta_L C_p / C_L)$ ;

b.楔块中声束扩散角  $\gamma_p = \arcsin(FC_p / Df)$ ;

c.楔块中上边界角  $\gamma_{p上} = \theta_p + \gamma_p$ ;

d.楔块中下边界角  $\gamma_{p下} = \theta_p - \gamma_p$ ;

e.钢中声束上边界角  $\gamma_{L上} = \arcsin(\sin \gamma_{p上} C_L / C_p)$ ;

f.钢中声束下边界角  $\gamma_{L下} = \arcsin(\sin \gamma_{p下} C_L / C_p)$ ;

(2)相邻通道有效覆盖区域宽度：

$$L = \left| \frac{\frac{\text{PCS}_{\text{前通道}}}{\tan \theta_{\text{前通道下扩散角}}} - \frac{\text{PCS}_{\text{后通道}}}{\tan \theta_{\text{后通道上扩散角}}}}{\tan(90 - \theta_{\text{前通道下扩散角}}) + \tan(90 - \theta_{\text{后通道上扩散角}})} \right|$$

(3)TOFD 检测覆盖宽度随探头中心距（PCS）增大而增大（如图 B-5 所示），因此偏置计算依据最小覆盖宽度作为参考宽度（如图 B-6 所示），以确保各次扫查覆盖宽度叠加的有效性。

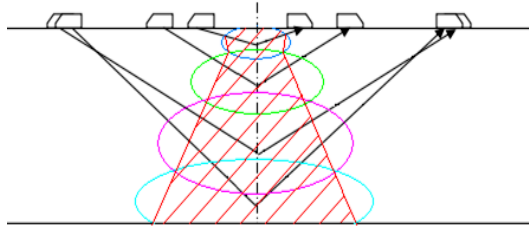


图 B-5 覆盖宽度示意

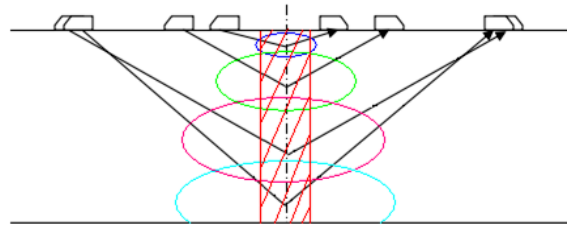
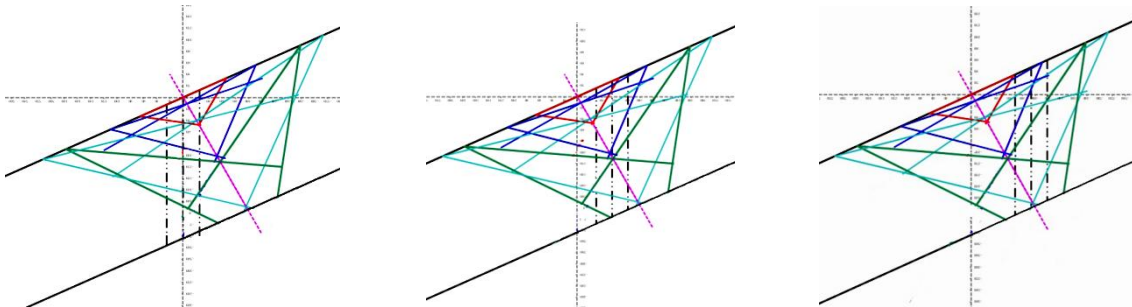


图 B-6 参考宽度

B.3.2.3 探头组每次进行偏置覆盖的移动值应不大于参考宽度的 80%。



中心扫查（覆盖上部）

偏置扫查 1（覆盖中部）

偏置扫查 2（覆盖下部）

图 B-7 扫查示意

团体标准

热壁加氢反应器的衍射时差法超声检测技术要求

编制说明

（征求意见稿）

一重集团大连核电石化有限公司

（2026 年 1 月）

# 热壁加氢反应器的衍射时差法超声检测技术要求

## 一、任务来源

《热壁加氢反应器的 TOFD 检测技术要求》（T/CASEI XXX-XXXX）团体标准项目来源于一重集团大连核电石化有限公司,以 NB/T47013 标准为蓝本,适用于热壁加氢反应器产品的 TOFD 检测。

本标准立项名称为《热壁加氢反应器的 TOFD 检测技术要求》，为与国家、行业标准的技术名称保持一致，经起草组讨论，名称修改为《热壁加氢反应器的衍射时差法超声检测技术要求》。

## 二、主要工作单位、工作成员及负责内容

本标准由一重集团大连核电石化有限公司提出，中国特种设备检验协会归口管理，由一重集团大连核电石化有限公司负责和组织起草，为提高标准应用的广泛性，国内相关特种设备设计、制造、安装和检测单位参与了标准的编写和讨论。

研究工作由一重集团大连核电石化有限公司牵头承担，中国特种设备检测研究院、中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司、中国石化工程建设有限公司、中石化广州工程有限公司、中石油华东设计院有限公司、华东理工大学、合肥通用机械研究院、森松（江苏）重工有限公司、齐齐哈尔市检验检测中心、大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司、国能锅炉压力容器检验有限公司、南阳汉冶特钢有限公司、吉林市特种设备检验中心、北京市朝阳区特种设备检测所、天津市特种设备监督检验技术研究院、江苏省特种设备安全监督检验研究院连云港分院、北京邹展麓城科技有限公司参与，组成标准编写组。

本部分参编人员有：程明、杨齐、胡庆斌、周凤革、王浩为、尹青峰、张国信、谢育辉、朱明亮、陈贤洮、江雁山、李辉、刘中军、郝晓军、杨阳、王德林、程红伟、刘怏欢、丁小平、梁庆业、李剑峰

### 三、 编制过程

2023 年 7-10 月：收集压力容器无损检测相关标准、总结热壁加氢反应器无损检测工程经验、与设计院沟通热壁加氢反应器无损检测特殊要求；

2023 年 11 月-12 月：完成并提交标准立项申请书；

2024 年 01 月-2025 年 06 月：编制热壁加氢反应器的 TOFD 检测技术要求团体标准；

2025 年 07 月—11 月：完成标准草案初稿编制工作、无损检测标准编写组组内函审；

2025 年 12 月：根据函审意见，修改标准草案；召开无损检测标准编写组第二次会议，根据无损检测标准编写组第二次会议意见，修改标准草案；

2026 年 1 月-2 月：根据意见完成标准修改，形成标准的征求意见稿，提报协会。

### 四、 主要技术内容的说明

#### 4.1 编制原则

本标准遵照 NB/T47013 的整体要求，结合国内热壁加氢反应器的工程经验、检测要求、特点、验收要求，融合两者存在差异的部分，进行了详细的对比分析，同时最终确定差异内容的统一方式。对于存在较大差异的内容，充分听取各参编单位意见，讨论达成一致后最终确定统一方式。

统一标准草案编制过程中，对于术语和定义、检测人员资格、设备和器材等内容应遵照国内现行法规或标准的相关规定。

#### 4.2 主要内容

- 1) 范围：增加超范围应进行实验验证及取得监管部门许可要求；引出增加的堆焊层层下裂纹检测资料性附录 A 和容器封头与过渡段以及过渡段与

筒体不等厚焊接接头资料性附录 B。

- 2) 引用文件：增加 API RP 934 附录 A。
- 3) 术语定义：因正文涉及，增加“热壁加氢反应器”、“横向再热裂纹”、“相位反转实心显示”定义，在定义“平行扫查”中添加平行焊缝的扫查示意图及描述。
- 4) 设备器材：增加 TOFD-F 对比试块，优化扫查面盲区试块。对比试块及模拟试块的厚度要求修改为不小于被检工件的 0.9 倍。增加横向再热裂纹灵敏度验证试块示意图、制作及使用要求。
- 5) 检测技术要求：归一化技术等级，取消原有的 A/B/C 分级，统一要求。
- 6) 操作指导书的工艺验证：增加横向再热裂纹灵敏度验证要求及示意图。增加堆焊层检测可行性验证要求。
- 7) 检测程序：增加工艺验证。
- 8) 探头选取和设置：增加 400-500 区间探头参数推荐。
- 9) 扫查面和扫查方式的选择：根据热壁加氢反应器的特点，推荐环向接头和纵向接头的扫查面。
- 10) 时间窗口设置和深度校准：为防止窗口设置问题无法判断耦合不良等问题造成漏检问题，要求中间各分区通道设定实际时间窗口时，应至少涵盖直通波或底面反射波中的一种，以便于判别该通道在检测期间的工作状态；在缺陷评定时，可参照 c) 规定的有效时间窗口，选取对应区域展开评定。
- 11) 检测灵敏度设置：要求所有灵敏度设置必须在对比试块完成。
- 12) 检测系统的确认：要求必须在对比试块进行确认。
- 13) 检测：增加检测时机要求。根据热壁加氢反应器实际情况，明确是保留余高要求以及标记划线要求。增加从覆材侧用耦合剂有害元素要求。
- 14) 数据分析和解释：增加沿焊缝方向平行扫查的评定内容。

- 15) 增加资料性附录 A: 关于堆焊层层下母材裂纹检测, 从探头参数选择设置、扫查方式、层下裂纹的确认给出推荐方法。
- 16) 增加资料性附录 B: 对于容器过渡段与筒体、封头与过渡段对接不等厚接头 TOFD 检测方法, 给出扫查方式、补充扫查次数确认、参数选择、有效覆盖宽度测算公式给出推荐方法。

## 五、与国外同类标准水平的对比分析

本标准参考 NB/T 47013.10-2015 与 API RP 934-A《高温高压氢服务用厚壁 Cr-Mo 钢压力容器材料与制造》的相关技术要求, 针对热壁加氢反应器的结构特性、技术要求以及国内应用经验, 优化了 TOFD 检测技术要求。

与 API RP 934-A 相比, 本标准更聚焦 TOFD 检测专项技术, 细化了堆焊层、厚壁结构的检测参数, 实操性更强。

在再热裂纹检测方面, 采用 EDM 槽试块验证灵敏度, 与国际标准的技术思路一致, 且补充了中国工程实践中成熟的扫查方式和评定规则。

对比试块设计兼顾了通用性和专项性, 既兼容 NB/T 47013 的试块体系, 新增了部分试块, 技术水平与国际同类标准相当, 且更贴合国内设备制造和检测现状。

## 六、与现行法规、标准的关系

1. 本标准依据 GB/T 1.1—2020 起草, 技术要求符合《特种设备安全法》《特种设备无损检测人员考核规则》等法规要求。
2. 本标准以 NB/T 47013 系列标准为基础, 是对承压设备 TOFD 检测通用要求的专项补充, 与 NB/T 47013.1、NB/T 47013.3、NB/T 47013.10 等标准协调一致, 无技术冲突。
3. 引用 API RP 934-A 等国际标准的先进技术内容, 同时结合国内设备制造水平进行本土化适配, 形成“通用标准+专项补充”的技术体系, 可为热壁

加氢反应器的制造、安装、运维提供技术支撑。

## 七、实施标准的要求和措施的建议

1. 本标准为专项技术要求，实施时应结合热壁加氢反应器的制造技术文件、运行工况，明确检测时机、检测技术要求及验收要求。
2. 检测机构应配备本标准规定的专用试块（如堆焊层对比试块、再热裂纹验证试块），对检测人员开展专项培训，确保掌握厚壁分区检测、堆焊层缺陷识别等关键技术。
3. 标准实施后，建议开展行业内应用验证，收集检测数据和反馈意见，适时进行修订完善。

## 八、参考资料清单

|              |                             |
|--------------|-----------------------------|
| GB/T 12604.1 | 无损检测 术语 超声检测                |
| GB/T 27664.1 | 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第1部分：仪器   |
| GB/T 27664.2 | 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分：探头   |
| JB/T 9214    | 无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法 |
| JB/T 10062   | 超声探伤用探头 性能测试方法              |
| JB/T 8428    | 无损检测 超声试块通用规范               |
| NB/T47013.1  | 承压设备无损检测 第1部分：通用要求          |
| NB/T47013.2  | 承压设备无损检测 第2部分：射线检测          |
| NB/T47013.3  | 承压设备无损检测 第3部分：超声检测          |
| NB/T47013.4  | 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测          |
| NB/T47013.5  | 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测          |
| NB/T47013.6  | 承压设备无损检测 第6部分：涡流检测          |

NB/T 47013.10-2015 承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测

API RP 934-A Materials and Fabrication of  $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ ,  $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo-}\frac{1}{4}\text{V}$ ,  $3\text{Cr-1Mo}$ , and  $3\text{Cr-1Mo-}\frac{1}{4}\text{V}$  Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service (高温高压临氢环境用厚壁铬钼钢压力容器的材料与制造规范, 规范性引用)