

承压设备中厚板对接接头相控阵超声和
衍射时差法超声组合检测

Combined nondestructive testing in butt joint welding
of thick plates in pressure equipment: using phased array ultrasonic
and time-of-flight diffraction combination detection

2023 - 11 - 09 发布

2024 - 02 - 09 实施

目 次

前言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 缩略语..... 2

5 一般要求..... 2

 5.1 基本规定..... 2

 5.2 检测设备和器材..... 3

 5.3 无损检测工艺文件..... 3

 5.4 检测设备的校准、核查、运行核查和检查..... 3

6 检测工艺..... 4

 6.1 检测工艺技术要求..... 4

 6.2 工艺验证..... 9

7 检测过程..... 9

 7.1 检测准备..... 9

 7.2 检测实施..... 10

8 检测数据分析和评价..... 11

 8.1 检测数据分析和评价要求..... 11

 8.2 分析判定缺陷..... 11

9 缺陷的评定和质量分级..... 11

 9.1 缺陷评定..... 11

 9.2 质量分级..... 11

 9.3 PAUT 焊接接头质量分级..... 11

 9.4 TOFD 对接接头缺陷评定..... 13

 9.5 缺陷的定性..... 13

 9.6 记录和报告..... 13

10 检测质量控制..... 13

附录 A（资料性） PAUT 和 TOFD 组合检测操作指导书..... 15

附录 B（资料性） 焊接接头 PAUT 和 TOFD 组合检测报告..... 17

参考文献..... 20

前 言

本文件按照 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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由湖南省市场监督管理局提出。

本文件由湖南省特种设备标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：湖南省特种设备协会、湖南省湘电锅炉压力容器检验中心有限公司、湖南安卓特种设备科技有限公司、湖南安淳高新技术有限公司、中安检测集团（湖北）有限公司。

本文件主要起草人：李高强、陈红冬、梁恭增、樊岑、谢阿萌、李建熙、何星、樊彬彬、李盛、谭健、李力君。

承压设备中厚板对接接头相控阵超声和衍射时差法超声组合检测

1 范围

本文件规定了特种设备中钢制承压设备中厚板对接接头相控阵超声和衍射时差法超声组合检测方法的一般要求、使用原则和质量分级。

本文件适用于符合 NB/T 47013.15 规定的铁素体钢制承压设备全熔化焊 I 型焊接接头中, 工件公称厚度 t : $12\text{ mm} \leq t \leq 400\text{ mm}$ 对接接头相控阵超声+衍射时差法超声组合检测方法的一般要求和质量分级。

对于其它细晶各向同性和低声衰减金属材料对接焊接接头的无损检测方法和质量分级可参照本标准进行, 但应考虑材料声学特性的变化, 并采用相应的专用对比试块。

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
- JB/T 8428 无损检测 超声试块通用规范
- JB/T 9214 无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能的性能与检验
- JB/T 11731 无损检测 超声相控阵探头通用技术条件
- JB/T 11779 无损检测 相控阵超声检测仪技术条件
- JJF 1338 相控阵超声探伤仪校准规范
- NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第 1 部分: 通用要求
- NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第 3 部分: 超声检测
- NB/T 47013.10 承压设备无损检测 第 10 部分: 衍射时差法超声检测
- NB/T 47013.15 承压设备无损检测 第 15 部分: 相控阵超声检测

3 术语和定义

GB/T 12604.1、NB/T47013.1、NB/T47013.3、NB/T47013.10、NB/T47013.15 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

相控阵超声检测 **phased-array ultrasonic testing**

根据设定的延迟法则激发相控阵阵列探头各独立压电晶片(阵元), 合成声束并实现声束的移动、偏转和聚焦等功能, 再按一定的延迟法则对各阵元接收到的超声信号进行处理并以图像的方式显示对象内部状态的超声检测方法。

[来源: NB/T 47013.15—2021, 3.2]

3.2

衍射时差法超声检测 **TOFD time of flight diffraction**

是采用一发一收的探头对工作模式、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。

[来源：NB/T 47013.10—2015，3.2]

3.3

PAUT+TOFD 组合检测 PAUT+TOFD combination detection

PAUT 和 TOFD 对被检工件同一部位进行机械扫查检测，二种探头可装在同一扫查器上同时扫查，也可分别进行扫查，综合 PAUT 和 TOFD 的图谱及相关信息对缺陷进行定位、定量和定性的检测方法。

3.4

工件厚度 t base material nominal thickness

对于平板对接接头，焊缝两侧母材厚度相等时，工件厚度 t 为母材公称厚度；焊缝两侧母材厚度不相等时，工件厚度为薄侧母材公称厚度，检测工艺及对比试块的选择以厚侧公称厚度为准。

[来源：NB/T 47013.3—2015，3.7，有修改]

3.5

全覆盖 full coverage

按设定的扫描和扫查方式，使超声声束覆盖全部检测区域。

3.6

表面缺陷 surface defects

距最近工件表面的距离小于等于缺陷高度一半的缺陷。

3.7

埋藏缺陷 bury defects

距最近工件表面的距离大于缺陷高度一半的缺陷。

3.8

铁素体钢 ferritic steel

常温下金相组织为铁素体的碳素钢、低合金钢、铬钼钢，不含铁素体不锈钢。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

PAUT：相控阵超声检测；

TOFD：衍射时差法超声检测。

5 一般要求

5.1 基本规定

5.1.1 PAUT 按 NB/T 47013.15 执行；TOFD 按 NB/T 47013.10 执行。

5.1.2 钢制承压设备壁厚大于等于 12 mm，检测面曲率半径大于等于 250 mm 对接接头，结构允许时，优先选用 PAUT 和 TOFD 同步检测；当壁厚较大，需进行厚度分区扫查而无法同步检测时，PAUT 和 TOFD 可分开单独扫查，应采用机械扫查。

5.1.3 以 PAUT 为主对焊接接头进行检测和质量分级。TOFD 主要补充检测与检测面垂直或接近垂直的面状危险性缺陷，如裂纹、双面焊的根部未焊透或未熔合、坡口角度小于 5° 的窄间隙及“U”型焊缝的坡口未熔合等缺陷并质量分级；辅助用于对缺陷自身高度的测量和缺陷的定性。

5.1.4 检测人员的要求应符合 NB/T 47013.1、NB/T 47013.10、NB/T 47013.15 的有关规定。

5.2 检测设备和器材

5.2.1 相控阵检测设备应具备焊缝双侧扫查和 TOFD 同时检测功能,各项技术参数指标和性能应分别满足 NB/T47013.15—2021 和 NB/T47013.10—2015 的要求。TOFD 检测设备应符合 NB/T 47013.10—2015 的要求。

5.2.2 采用的标准试块为 CSK-I A、DB-PZ20-2、A 型相控阵试块和 B 型相控阵试块。

5.2.3 PAUT 通用对比试块和专用对比试块应符合 NB/T 47013.15—2021 的规定,TOFD 通用对比试块和专用对比试块应符合 NB/T 47013.10—2015 的规定。

5.2.4 PAUT 模拟试块应符合 NB/T 47013.15—2021 的规定。

5.2.5 耦合剂应透声性较好且不损伤工件表面,如机油、化学浆糊、甘油和水等。耦合剂应在工艺文件规定的温度范围内稳定可靠。

5.3 无损检测工艺文件

5.3.1 按 NB/T 47013.1、NB/T 47013.10、NB/T 47013.15 的要求编制无损检测工艺规程。

5.3.2 操作指导书应根据被检工件和工艺规程的要求编写;表格或格式可参照附录 A。

5.3.3 操作指导书在首次应用前,应按相关要求进行工艺验证并记录工艺验证相关数据、结果和图谱。

5.3.4 检测原始记录应包括可查的检测实施过程的影像见证资料,检测报告应附超标缺陷的数据和图谱。

5.4 检测设备的校准、核查、运行核查和检查

应采用标准试块和对比试块;操作时应使探头主声束垂直对准反射体的反射面,以获得稳定和最大的反射信号。校准、核查和检查内容及周期见表 1。

表 1 校准、核查和检查内容及周期

项目	内容	周期
校准、核查	PAUT: 仪器和探头的组合性能中的垂直线性、水平线性、衰减器精度、组合频率、扇扫成像横向分辨率和纵向分辨率、扇扫角度范围和角度分辨率。性能指标应分别符合 NB/T47013.15 的要求。 TOFD: 仪器和探头的组合性能中的垂直线性、水平线性、灵敏度余量、组合频率、信噪比、-12dB 声束扩散角。性能指标应分别符合 NB/T 47013.10 的要求。	一年
运行核查	PAUT 和 TOFD: 仪器和探头的组合性能中的垂直线性、水平线性。	6 个月
	PAUT: 探头阵元有效性。失效阵元数量不超过探头阵元总数的 1/4, 且不允许相邻阵元连续失效。	一个月
检查	仪器设备器材外观、线缆连接和开机信号显示是否正常。	每次检测前
	位置传感器进行检查和记录, 移动 500 mm, 其误差应小于 1%。	每次检测前

6 检测工艺

6.1 检测工艺技术要求

6.1.1 检测时机

在承压设备的生产和使用过程中，检测时机应符合相关法规、规程、产品标准及有关技术文件的规定；具有延迟裂纹倾向的材料应当至少在焊接完成 24h 小时后进行检测。

6.1.2 检测技术等级

6.1.2.1 检测技术等级分级

检测技术等级分为 A、B、C 三个等级。其选择应符合承压设备制造、安装、改造、维修、使用等有关规范、标准及设计图样的规定，制造安装阶段的焊接接头的检测宜采用 B 级，对重要设备的焊接接头，可采用 C 级。不同检测技术等级的要求如下：

6.1.2.2 A 级检测

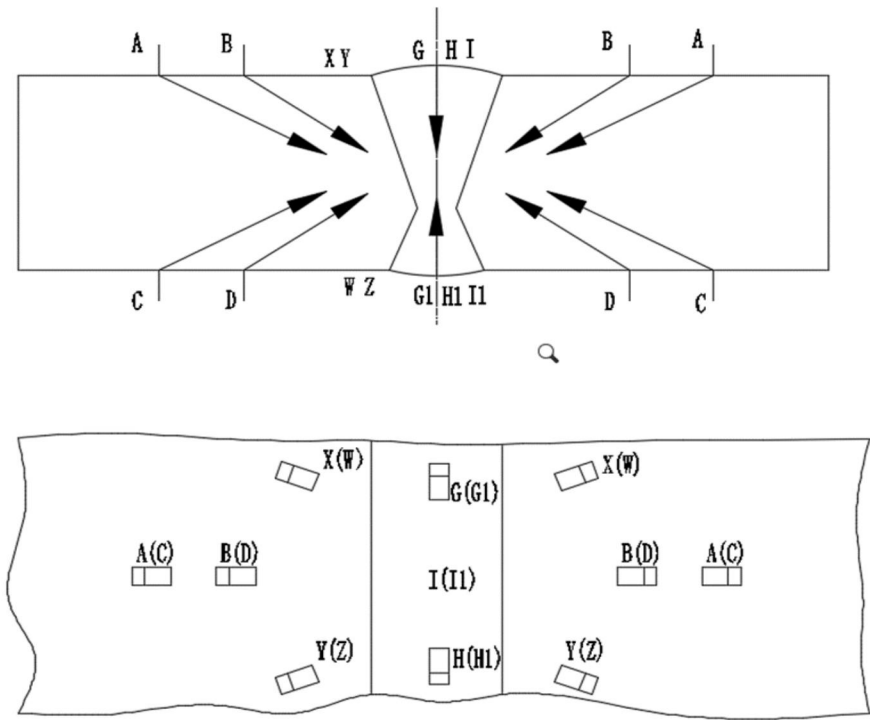
- a) 适用于 12 mm~40 mm 的对接接头的检测。
- b) 应保证相控阵声束对检测区域实现至少一次全覆盖。
- c) 从焊接接头单面双侧进行检测。
- d) 检测要求符合图 1 和表 2 的规定。
- e) 不要求进行横向缺陷检测。

6.1.2.3 B 级检测

- a) 适用于 12 mm~200 mm 的对接接头的检测。
- b) 应保证相控阵声束对检测区域实现至少两次全覆盖。
- c) 检测要求符合图 1 和表 2 的规定。
- d) 应进行横向缺陷检测。

6.1.2.4 C 级检测

- a) 适用于工件厚度为 12 mm~400 mm 的焊接接头的检测。
- b) 应将对接接头的余高磨平。
- c) 应保证相控阵声束对检测区域实现至少两次全覆盖。对声束经过的母材区域应采用纵波直入射法进行检测，检测方法按 NB/T 47013.15—2021 中的 6.4.8.2 的规定进行。
- d) 壁厚 ≥ 40 mm 的焊接接头，对检测区还应增加一次全覆盖纵波直入射法检测。
- e) 检测位置符合图 1（焊缝余高磨平），检测要求符合表 2 的规定。
- f) 应进行横向缺陷的检测。



注：A，B，C，D，G，G1，H，H1，I，I1，X，Y，W，Z 为探头位置

图 1 平板对接接头 PAUT 和 TOFD 检测探头位置示意图

表 2 平板对接接头 PAUT 和 TOFD 检测要求

检测技术等级	工件厚度	纵向缺陷检测					PAUT 横向缺陷扫查	
		PAUT				TOFD	斜入射扫查	
		斜入射扫查 A, B, C, D			直入射扇扫或线扫			
		检测面（侧）	扫查方式	扫查设置 _{a, b, c}	探头位置	探头位置	扫查方式及设置	探头位置
A 级	12≤t≤40	单面双侧	扇扫或线扫	一次波和二次波，每侧（面）1 种探头位置	—	B	—	—
B 级	12≤t≤40	单面双侧	扇扫	一次波和二次波，每侧≥1 种探头位置	—	B	扇扫	（X 和 Y）或（W 和 Z）或（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
	40<t≤100	双面双侧或	扇扫	一次波，或一次波和二次波，每侧≥1 种探头位置	—	B 和 D	扇扫	（X 和 Y）或（W 和 Z）或（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
		单面双侧	扇扫	一次波及一次波和二次波，每侧≥2 种探头	—	B	扇扫	（X 和 Y）或（W 和 Z）或（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
		100<t≤200	双面双侧	扇扫	一次波，每侧≥3 种探头	—	B 和 D	扇扫

表 2 平板对接接头 PAUT 和 TOFD 检测要求（续）

检测技术等级	工件厚度	纵向缺陷检测					PAUT 横向缺陷扫查	
		PAUT				TOFD		
		斜入射扫查 A, B, C, D			直入射扇扫或线扫		斜入射扫查	
		检测面（侧）	扫查方式	扫查设置 ^{a, b, c}	探头位置	探头位置	扫查方式及设置	探头位置
C 级	12≤t≤15	单面双侧或双面双侧	扇扫	一次波和二次波，每侧（面）≥1 种探头	—	B	扇扫	（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
	15<t≤40	双面双侧	扇扫	一次波，或（和）一次波和二次波，每侧≥1 种探头	—	B 和 D	扇扫	（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
	40<t≤100	双面双侧	扇扫	一次波，每侧≥2 种探头位置；或一次波和（或）二次波，每侧≥2 种探头位置	单面（I 或 I 1）	B 和 D	扇扫	（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
	t>100	双面双侧	扇扫	一次波，每侧≥3 种探头位置	单面（I 或 I 1）	B 和 D	扇扫	（G 和 H）或（G 1 和 H 1）
a 当使用同一探头采用不同激发孔径或同一孔径不同角度范围进行 2 组或 2 组以上扇扫时，也可视为 2 种或 2 种以上探头位置。 b 当检测厚度较小且焊缝宽度较大时，可能使用到三次波和四次波。 c 如仍不能实现检测区域全覆盖，应增加探头位置检测。								

6.1.2.5 PAUT 和 TOFD 检测，用两种或两种以上探头位置对对接接头进行厚度分区时，对应 PAUT 和 TOFD 的各分区均应在厚度方向依次向上覆盖相邻分区深度范围的 25%（对接接头中心线处）。

6.1.3 检测方式及检测面的选取

6.1.3.1 根据检测技术等级要求及表 4 表 5 的厚度分区，采用 PAUT 和 TOFD 同时检测或 PAUT 和 TOFD 分别检测；横向缺陷的检测采用 PAUT，检测要求应符合 NB/T47013.15 的规定；TOFD 检测按表 2 的探头位置采用非平行扫查。

6.1.3.2 检测面的选取应综合考虑被检工件的结构、制造工艺、缺陷的可能部位和取向、检测技术等级、检测实施的可操作性等因素。

6.1.4 对比试块的选用

PAUT 通用对比试块按 NB/T 47013.15—2021 的要求选取；TOFD 对比试块按 NB/T 47013.10—2015 的要求选取。

6.1.5 检测工艺参数设置

6.1.5.1 工艺参数设置的一般原则

PAUT 工艺参数应按 NB/T 47013.15—2021 的要求进行设置；TOFD 工艺参数应按 NB/T 47013.10—2015 的要求进行设置。

6.1.5.2 聚焦设置

6.1.5.2.1 PAUT 的检测声程范围在 50 mm 以下时，聚焦深度可以设置在最大探测声程处；当检测声程范围在 50 mm 以上时，聚焦深度可以选择检测声程范围的中间值或其他适当深度。TOFD 探头对主声束交点宜处于该探头对所检测深度范围的 2/3 处。

6.1.5.2.2 PAUT 在对缺陷进行精确定量时，或对特定区域检测需要获得更高的灵敏度和分辨力时，可将焦点设置在该区域（如能达到），但应注意聚焦区以外声场劣化问题。

6.1.5.3 PAUT 探头和 TOFD 探头的选择

6.1.5.3.1 PAUT 探头的选择

按 NB/T 47013.15 的相应要求选择，与工件厚度有关的相控阵探头参数选择参考表 3 和表 5。

表 3 扇扫描检测焊接接头时相控阵探头参数选择推荐表

工件厚度/mm	激发孔径/mm	标称频率/MHz	工件厚度/mm	激发孔径/mm	标称频率/MHz
12~15	6~12	5~10	>40~100	16~40	2~7.5
>15~40	8~20	4~10	>100	≥16	2~5
注 1：在满足检测灵敏度即信噪比的情况下，尽可能选择频率高的探头。 注 2：阵元长度 W 应大于或等于 6 mm。 注 3：当该表规定的探头参数与表 5 不一致时，以表 5 规定的为准。					

6.1.5.3.2 TOFD 探头的选择

按 NB/T 47013.10—2015 的相应要求选择，平板（或相当于平板）工件厚度有关的分区、探头选择和设置可参考表 4。

表 4 平板对接接头 TOFD 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
≥12~15	1	0~t	15~7	70~60	2~4
>15~35	1	0~t	10~5	70~60	2~6
>35~50	1	0~t	5~3	70~60	3~6
>50~100	2	0~2t/5	7.5~5	70~60	3~6
		2t/5~t	5~3	60~45	6~12
>100~200	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
>200~300	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

表 4 平板对接接头 TOFD 探头推荐性选择和设置（续）

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
>300~400	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

6.1.5.4 PAUT 延迟法则参数

根据检测对象和现场条件选择扫描类型确定延迟法则，具体要求按 NB/T 47013.15—2021，平板（或相当于平板）工件厚度有关的分区、探头选择和设置可参考表 5。

表 5 平板对接接头 PAUT 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	激发孔径/mm	扫查设置	扇扫角度范围
≥12~20	1	0~t	10~5	6~12	一次波和二次波，单面双侧	≤38°
>20~40	1	0~t	10~4	8~20	一次波和二次波，单面双侧	≤35°
>40~100	2	t/2~t	7.5~5	12~24	一次波单面双侧	≤35°
		0~t/2	5~2	19~32	二次波单面双侧	≤30°
>100~200	3	0~40	7.5~5	12~20	一次波，双面双侧	≤38°
		40~3t/5	5~2	16~32		≤30°
		3t/5~t	5~2	19~32		≤30°
>200~300	4	0~50	7.5~5	12~20	一次波，双面双侧	≤35°
		50~t/2	5~2	19~32		≤30°
		t/2~3t/4	5~2	≥24		≤30°
		3t/4~t	5~2	≥24		≤25°
>300~400	5	0~50	7.5~5	12~20	一次波，双面双侧	≤35°
		50~2t/5	5~2	19~32		≤30°
		2t/5~3t/5	5~2	≥24		≤30°
		3t/5~4t/5	5~2	≥32		≤25°
		4t/5~t	3~2	≥32		≤25°

6.1.5.5 TOFD PCS 设置

探头对 PCS 设置，宜使探头对的主声束交点位于其检测深度范围的 2/3 深度处。

6.1.5.6 PAUT 和 TOFD 灵敏度设置

PAUT 和 TOFD 灵敏度分别按 NB/T 47013.15—2021 和 NB/T 47013.10—2015 的规定设置。

6.2 工艺验证

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 操作指导书首次应用前应进行工艺验证。

6.2.1.2 对于简单几何形状的铁素体钢制对接接头的检测可采用通用对比试块进行工艺验证。

6.2.1.3 对于单侧厚度差较大（大于 5mm）的铁素体钢制对接接头的检测应制作相应的专用对比试块进行工艺验证。

6.2.1.4 按技术等级 C 级铁素体钢制对接接头的检测，应制作有代表性模拟试块，有代表性的模拟试块应覆盖工艺规程该类对接接头的范围，至少包含工件规格的最小值和最大值，并选用相应的模拟试块进行工艺验证。

6.2.2 工艺验证结果应符合以下要求

6.2.2.1 应能够清楚地显示试块中所有的参考反射体或缺陷。

6.2.2.2 测量的参考反射体或缺陷尺寸偏差在允许的范围內。

7 检测过程

7.1 检测准备

7.1.1 检测区域的确定

7.1.1.1 检测区域由其高度和宽度表征。检测高度为工件厚度加上焊缝余高。

7.1.1.2 检测宽度为焊缝本身加上焊缝熔合线两侧各 5 mm 或实测热影响区宽度（取大者）。

7.1.1.3 若对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。

7.1.2 母材检测

按 NB/T47013.15 的要求进行。

7.1.3 检测面要求与准备

按 NB/T 47013.15 的要求。

7.1.4 检测标识

检测前应在工件扫查面上予以标记，标记内容至少包括扫查起始点和扫查方向，以 PAUT 探头中心起始标记作为“0”点，扫查方向用箭头表示。当焊缝长度较长需要分段检测时，应画出分段标识，各段扫查区的重叠范围至少为 20mm；所有标记应对扫查无影响。

7.1.5 参考线

7.1.5.1 以 PAUT 探头扫查的步进方向作为参考线，在被检工件扫查面同时标记 PAUT 和 TOFD 扫查参考线。

7.1.5.2 应保持 PAUT 探头位置与设定的 PAUT 参考线位置的偏差不大于 5%。

7.2 检测实施

7.2.1 灵敏度调整

7.2.1.1 采用通用对比试块，应考虑与被检工件间的声学性能差异并进行必要的修正或补偿。

7.2.1.2 采用专用对比试块，应考虑表面条件不同引起的声能传输差异，必要时还应考虑两者间加工工艺差异引起的变化。

7.2.2 扫查

7.2.2.1 扫查方式和扫描方式的选择

PAUT 优先采用扇扫描+纵向垂直扫查，显示方式可选择声程显示成像或几何结构显示成像；TOFD 采用非平行扫查。

7.2.2.2 扫查速度要求

按 NB/T 47013.10—2015、NB/T 47013.15—2021 的要求分别计算相应的最大扫查速度，取最小值作为 PAUT+TOFD 组合检测扫查的最大扫查速度，且须满足耦合效果和数据采集的要求。

7.2.3 耦合剂的选用及工件表面温度要求

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；被检工件的表面温度应控制在 $0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，若温度超过 50°C 或低于 0°C ，可采用特殊探头或耦合剂；检测系统设置和校准与实际检测工件表面温度之差应控制在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 之内。

7.2.4 检测系统的复核

7.2.4.1 复核时机

按 NB/T 47013.10—2015、NB/T 47013.15—2021 的要求。

7.2.4.2 复核内容与要求

主要复核灵敏度、位置传感器和深度显示偏离情况；复核与初始设置时所使用的对比试块及其他技术条件均应相同；若复核时发现初始设置的参数偏离，应按表 6 的规定执行。

表 6 偏离和纠正

	类型	偏差	纠正
PAUT 和 TOFD	位移	$\leq 5\%$	不需要采取措施
		$> 5\%$	应对上次设置以后所检测的位置进行修正
	深度	$\leq 2\text{ mm}$ 或板厚的 3% （取较大值）	不需要采取措施
		$> 2\text{ mm}$ 或板厚 3% （取较大值）	应重新设置，并重新检测上次设置后所检测的部位
PAUT	灵敏度	$\leq 3\text{ dB}$	不需要采取措施
		$> 3\text{ dB}$	应重新设置，并重新检测上次设置后所检测的部位
TOFD	灵敏度	$\leq 6\text{ dB}$	不需要采取措施
		$> 6\text{ dB}$	应重新设置，并重新检测上次设置后所检测的部位

8 检测数据分析和评价

8.1 检测数据分析和评价要求

承压设备对接接头 PAUT 和 TOFD 检测数据分析和评价分别按 NB/T47013.15 和 NB/T47013.10 的要求进行。

并根据 PAUT 检测数据和图谱、TOFD 检测数据和图谱、被检工件状况等确认图像中的相关显示，分析并判定缺陷性质，测量缺陷的尺寸和位置。

9 缺陷的评定和质量分级

9.1 评定原则

凡判定为裂纹、坡口未熔合及未焊透等危害性的缺陷显示，评为Ⅲ级。质量分级以 PAUT 为主；TOFD 主要适用于检测与检测面垂直或接近垂直的裂纹、未熔合和未焊透等缺陷及缺陷自身高度的测量，并辅助用于缺陷性质的判定。

9.3 焊接接头 PAUT 质量分级

9.2.1 凡在判废线（含判废线）以上的缺陷显示，评为Ⅲ级。

9.2.2 凡在评定线（不含评定线）以下的缺陷显示（判定为裂纹、坡口未熔合及未焊透等危害性的缺陷显示除外），评为Ⅰ级。

9.2.3 质量分级方法

9.2.3.1 钢制承压设备全熔化焊Ⅰ型对接接头质量分级方法一（主要适用于制造安装阶段）：

- a) 缺陷长度按实测值计；
- b) 质量分级按表 7 的规定。

表 7 钢制承压设备全熔化焊对接接头 PAUT 质量分级方法一

单位为 mm

质量等级	工件厚度 t	反射波幅所在区域	允许的单个缺陷指示长度	多个缺陷累计长度最大允许值/L'
Ⅰ级	≥12~100	Ⅰ	≤50	—
	>100		≤75	—
	≥12~100	Ⅱ	≤t/3, 最小可为 10, 最大不超过 30	在任意 9 t 焊缝长度范围内, 且深度在工件厚度 40% (最小可为 6 mm, 但最大不超过 30 mm), L' 不超过 t 且最大不超过 150
	>100		≤t/3, 最大不超过 50	
Ⅱ级	≥12~100	Ⅰ	≤60	—
	>100		≤90	—

表 7 钢制承压设备全熔化焊对接接头 PAUT 质量分级方法一（续）

单位为 mm

Ⅱ级	≥12~100		≤2t/3, 最小可为 12, 最大不超过 40	在任意 4.5 t 焊缝长度范围内, 且深度在工件厚度 40% (最小可为 6 mm, 但最大不超过 30 mm), L' 不超过 t 且最大不超过 200
	>100		≤2t/3, 最大不超过 75	
Ⅲ级	≥12	Ⅱ	超过Ⅱ级者	
		Ⅲ	所有缺陷	
		Ⅰ	超过Ⅱ级者	-

9.2.3.2 钢制承压设备全熔化焊Ⅰ型对接接头质量分级方法二（主要适用于在用阶段）：

- a) 圆形缺陷的评定按 9.3.2.1 的规定进行；
- b) 条形缺陷的评级按表 8 的规定

表 8 钢制承压设备全熔化焊对接接头 PAUT 质量分级方法二

单位为 mm

质量等级	工件厚度	单个缺陷						多个缺陷
		表面缺陷			埋藏缺陷			
		长度 $l_{\max}$	高度 h_3	若 $l>l_{\max}$ 缺陷高度 l_1	长度 $l_{\max}$	高度 h_2	若 $l>l_{\max}$ 缺陷高度 l_1	
Ⅰ级	$12\leq t\leq 15$	8	2.0	1.0	8	2.0	1.0	1) 多个缺陷其各自高度 h 均为: $h_1<h\leq h_2$, 则在任意 $12t$ 范围内, 且深度在工件厚度 40% (最小可为 6 mm, 但最大不超过 30 mm), 累计长度不超过 $2t$ 且最大值为 150 mm; 2) 对于单个或多个允许的的表面缺陷, 其最大累计长度不得大于整条焊缝长度的 5% 且最长不得超过 200 mm
	$15<t\leq 40$	15	2.5	1.5	15	2.5	1.5	
	$40<t\leq 60$	25	3	2.0	25	3.0	2.0	
	$60<t\leq 100$	35	3.5	2.0	35	4.0	2.5	
	$100<t\leq 200$	45	3.5	2.5	45	5.0	3.0	
	$t>200$	45	3.5	2.5	45	5.0	3.0	
Ⅱ级	$12\leq t\leq 15$	t	2.0	1.0	t	2.0	1.5	1) 多个缺陷其各自高度 h 均为: $h_1<h\leq h_2$ 或 h_3 , 则在任意 $12t$ 范围内, 且深度在工件厚度 40% (最小可为 6 mm, 但最大不超过 30 mm), 累计长度不超过 $3t$ 且最大值为 200 mm; 2) 对于单个或多个允许的的表面缺陷, 其最大累计长度不得大于整条焊缝长度的 10% 且最长不得超过 300 mm
	$15<t\leq 40$	t	2.5	1.5	t	3.0	2.0	
	$40<t\leq 60$	40	2.5	1.5	40	4.0	2.5	
	$60<t\leq 100$	50	3.0	2.0	60	5.0	3.0	
	$100<t\leq 200$	60	3.0	2.0	80	6.0	3.5	
	$t>200$	80	3.5	2.5	100	6.0	3.5	
Ⅲ级	12~400	超过Ⅱ级者						
注: 母材壁厚不同时, 取薄侧厚度值。								

9.3 对接接头 TOFD 缺陷评定及缺陷定性

9.3.1 对 TOFD 数据和图谱评定为线状、条状显示的部位，应增加 PAUT 手动检测，进行锯齿形、前后、左右、转角、环绕扫查，确定缺陷的位置、当量和性质。质量分级按 9.3 的规定执行。

9.3.2 根据 PAUT、TOFD 图谱和检测信息，确定缺陷位置、波幅和指示长度，缺陷自身高度，并对缺陷的类型或性质进行判定。

9.3.3 缺陷性质的判定，应综合考虑设备的使用工况、制造阶段的工件状况（包括焊接工艺、工件结构、坡口型式、返修等）、缺陷的位置、指示长度、自身高度、缺陷波幅、缺陷指向性等信息，结合缺陷的 PAUT 和 TOFD 检测图谱的典型特征进行判定。

9.4 记录和报告

9.4.1 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，还至少应包括以下内容：工艺规程版次或操作指导书编号、检测技术等级、被检工件信息、焊接接头结构、检测设备及器材、检测技术要求、检测实施的影像资料、检测结果、评定及复评记录、检测人员信息等。

9.4.2 根据检测记录及时准确出具无损检测报告。检测报告除符合 NB/T47013.1 的规定外，还至少应包括以下内容：委托单位、检测记录编号、检测技术等级、检测设备及器材、检测示意图、超标缺陷数据和图谱。检测报告可参照附录 B。

10 检测质量控制

检测质量控制点及控制内容见表 9。

表 9 检测质量控制点

项目	控制点	质量控制内容
检测人员	检测人员持证情况和数量	具有一定的金属材料、焊接、热处理及承压类设备制造安装方面的基础知识，具有相关资格证等。
检测设备器材	仪器和探头性能	合格证，测试报告。
	仪器和探头性能组合性能	测试报告
	检测设备的校准、核查、运行核查、检查	测试记录
	标准试块、对比试块、模拟试块	合格证或检验记录
	耦合剂	—
检测工艺文件	工艺规程	文件
	操作指导书及工艺验证	文件和记录
检测实施	检测面表面状况	清除探头移动区域的焊接飞溅、铁屑及其它污物，并打磨，检测面应平整，便于探头的移动和耦合。
	检测标识、参考线	标识扫查起始点、扫查方向、扫查时步进方向行走的预定线（参考线）。
	前端距、PCS	保证前端距和 PCS 与操作指导书要求的一致，误差不应大于 5%。
	耦合状况	扫查时，应监控耦合状况，耦合不良时应重新扫查；扫查图像中耦合不良不得超过扫查长度的 5%，单个耦合不良长度不得超过 3 mm。

表 9 检测质量控制点（续）

项目	控制点	质量控制内容
检测实施	检测系统的复核时机及要求	a) 初始检测时； b) 检测过程中仪器、探头、连接线缆或耦合剂更换时； c) 检测人员有怀疑时； d) 连续工作 4 小时； f) 检测系统设置校准时的温度与实际检测温度差大于 15℃时； g) 检测结束时。
	检测系统的复核内容及要求	复核检测灵敏度、位置传感器、深度显示偏离情况。
	扫查覆盖	≥50 mm
检测数据和图像 评判	检测图像	检测图像应包括 S 型、A 型、B 型和 C 型和 D 型显示，图像显示应有位置信息。
	检测数据	确定所采集的数据的有效性，至少得满足如下要求： a) 数据是基于扫查步进而采集的； b) 采集的数据应耦合良好，且数据量应满足检测长度的要求； 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 扫信号连续丢失量不得超过 NB/T47013.15 规定的最大扫查步进的两倍；缺陷部位 A 扫信号丢失不得影响缺陷的评定。
缺陷评定	数据分析	应结合 PAUT 和 TOFD，综合被检工件的材料、焊接结构、制造特点、波谱特性、经验等进行分析和研判。应进行初评和复评。
记录和报告	记录和报告	准确记录和报告检测对象的检测结果，超标缺陷数据和图像截图存入报告中。

附 录 A
(资料性)
PAUT 和 TOFD 组合检测操作指导书

表 A.1 规定了 PAUT 和 TOFD 组合检测操作指导书格式。

表 A.1 PAUT 和 TOFD 组合检测操作指导书

编号：

被检工件	产品名称				产品编号				设备类别					
	材质				产品规格				设备状态					
	工件名称				工件编号				焊接方法					
	接头型式				坡口型式				焊缝宽度		外表面： 内表面：		mm mm	
	热处理状态				检测时机				检测区域		外表面： 内表面：		mm mm	
检测设备器材	仪器型号				扫查装置				标准试块					
	PA 对比试块				TOFD 对比试块				耦合剂					
检测技术要求	检测标准/合格级别				检测技术等级				检测比例					
	扫查面				表面状态				每侧打磨宽度					
	检测温度				采样频率				表面补偿					
检测用探头及楔块	PA 检测探头、楔块参数：													
	探头位置	探头型号	探头频率	孔径	阵元间距	阵元间隙	阵元长度	阵元数量	楔块型号	楔块角度	楔块高度	楔块前沿	折射角	
	TOFD 检测探头、楔块参数：													
	探头位置		探头型号		探头频率		晶片尺寸		楔块型号		楔块折射角		楔块前沿	
工艺参数	PA 检测工艺参数：													
	探头位置		扫查类型	激发孔径	起始晶片	前端距	扫查轴偏移量		聚焦深度及位置		角度范围	覆盖深度	定量线灵敏度	

	TOFD检测工艺:
--	-----------

16

附 录 B

(资料性)

焊接接头 PAUT 和 TOFD 组合检测报告

表 B.1 规定了焊接接头 PAUT 和 TOFD 组合检测报告格式。

表 B.1 焊接接头 PAUT 和 TOFD 组合检测报告

编号：

被检 工件	产品名称				产品编号				设备类别				
	材质				产品规格				设备状态				
	工件名称				工件编号				焊接方法				
	接头型式				坡口型式				焊缝宽度		外表面： 内表面：	mm mm	
	热处理状态				检测时机				检测区域		外表面： 内表面：	mm mm	
检测 设备 器材	仪器型号				扫查装置				标准试块				
	PA 对比试块				TOFD 对比试块				耦合剂				
检测 技术 要求	检测标准 /合格级别				检测技术等级				检测比例				
	扫查面				表面状态				每侧打磨宽度				
	检测温度				采样频率				表面补偿				
作业指导书编号：													
检测 用探 头及 楔块	PA 检测探头、楔块参数：												
	探头 位置	探头 型号	探头 频率	孔径	阵元 间距	阵元 间隙	阵元 长度	阵元 数量	楔块 型号	楔块 角度	楔块 高度	楔块 前沿	折射 角
	TOFD 检测探头、楔块参数：												
	探头位置		探头型号		探头频率		晶片尺寸		楔块型号		楔块折射角		楔块前沿
	PA 检测工艺参数：												
工艺 参数	探头位置	扫查类型	激发孔径	起始晶片	前端距	扫查轴偏 移量	聚焦深度 及位置	角度范围	覆盖深度	定量线灵 敏度			

表 B.1 焊接接头 PAUT 和 TOFD 组合检测报告（续）

缺陷位置及图谱										
检测结论：										
检测人（资格）： 日 期：						审核人（资格）： 日 期：				

参 考 文 献

- [1] TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程
 - [2] TSG 11—2020 锅炉安全技术规程
-