地方标准

《钛及钛合金材料制设备焊接接头

衍射时差法超声检测方法》

编制说明

陕西省特种设备检验检测研究院等

**地方标准《钛及钛合金材料制设备焊接接头**

**衍射时差法超声检测方法》**

**编制说明**

# 一、工作简况

**（一）任务来源**

陕西省市场监督管理局于2022年5月20日批准下达了《钛及钛合金材料制设备焊接接头衍射时差法超声检测方法》国家标准制定项目（项目计划号为：SDBXM212-2022，项目周期为 18个月）。

本标准由陕西省特种设备检验检测研究院作为牵头单位负责起草。

# （二）标准编制过程

衍射时差法超声检测（以下简称“TOFD”）技术在西方发达国家已发展成为一项专门的无损检测方法,广泛应用于锅炉、压力容器、压力管道等工程中的金属和非金属检测，在美国有关动力锅炉与压力容器制造的无损检测要求方面，甚至出现替代射线检测的趋势。随着 TOFD 技术的发展和应用的日益深入，西方发达国家均制订了 TOFD 检测标准。这些标准中对涉及 TOFD 检测的各个环节均作了具体规定，有着较强的可操作性和科学性。为促进我国 TOFD 技术在钛合金材料焊接质量控制领域的进一步发展和推广应用、标准体系的完善，急需建立一项关于化工塑料焊接制承压设备的 TOFD 检测标准。

目前国内还没有钛及钛合金材料制承压设备的 TOFD 检测标准，已有针对碳钢材质对接焊缝的 TOFD 检测行业标准，例如 NB/T47013.10-2015《承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测》。根据标准项目计划要求，成立了标准起草工作组，并由陕西省特种设备检验检测研究院牵头负责起草工作。标准起草工作组人员收集了国内外资料，走访了有关生产、使用、科研及设计单位，通过仿真研究和试验对标准中主要工艺参数进行了验证，并在钛合金材料设备上就行了现场检测试验。在此基础上，按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》的要求进行标准编写。

2022 年 5月标准起草工作组讨论本项标准内容大纲和主要制订内容，形成标准框架讨论稿。2023年 3月在前期调研、仿真、试验和工程应用研究（采用 TOFD 技术分别对钛合金材料制作不同厚度的对比试块进行CIVA 软件 TOFD 检测仿真研究；在实验室的条件下，对钛合金材料焊缝进行检测试验研究，得到了典型缺陷的特征图谱；起草组单位西安优耐特容器制造有限公司采用衍射时差法超声检测在该公司多个焊接设备检测项目中得到应用，检出多个缺陷并经解剖验证基础上完成了标准工作组讨论稿。2022年末，因新冠疫情的反复影响，对本标准的试验研究、会议等活动等产生不利影响，对标准的起草工作造成了较大影响。

2023年 8月，标准起草工作组基本完成标准相关试验研究工作，向陕西省市场监督管理局标准化技术委员会提交了标准征求意见稿。

# 二、标准的编制原则和条款主要内容

**（一）标准的编制原则**

我们的制定原则是积极参照采用国外先进标准，充分吸收国外的先进经验，符合我国的实际情况，力求标准中的每一项条款都具有一定的科学性合理性。

从收集的资料来看，目前国内还没有关于钛合金材料焊接制承压设备的 TOFD 检测标准。能源行业标准 NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》中仅适用于材料为低碳钢和低合金钢的焊接接头的 TOFD 检测。美国试验和材料学会（ASTM）于 2004 年颁布的 ASTM E2373《采用超声波衍射时差法的标准实施规程》适用材料的范围则包括了金属和非金属。

# （二）标准中主要条款说明

本标准包括范围、规范性引用文件、术语和定义、一般要求、检测工艺参数的选择与设置、检测、检测数据分析、缺陷评定和质量分级、检测记录和报告十个部分内容和规范性附录 A 和资料性附录 B。

1、范围

1.1 本部分适用于同时具备下列条件的焊接接头：

a) 材料为钛及钛合金；

b) 全焊透结构形式的对接接头；

c) 工件公称厚度 t:12mm≤t≤50mm（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）。

2、规范性引用文件

本章列出了本标准条款中直接引用的技术规范和标准，包括：

|  |  |
| --- | --- |
| 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 |
| GB/T 27664.3 | 无损检测超声检测设备的性能与检验第 3 部分：组合设备 |
| GB/T 5193 | 钛及钛合金加工产品超声检验方法 |
| 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 |
| JB/T10062 | 超声探伤用探头 性能测试方法 |
| JB/T9214 | 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 |

其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

3、术语和定义

本章规的术语和定义主要参照 NB/T47013.10-201《5

承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测》。

相关显示指的是钛合金材料焊接时可能产生的缺陷所产生的 TOFD 图像显示，这些缺陷包括夹杂

、气孔、裂纹、未焊透、未熔合和其它焊接缺陷。

4、一般要求

本章规定了钛及钛合金焊接制承压设备衍射时差法超声检测人员、机构、环境条件、检测设备与器材、检测技术等级、检测工艺文件、检测程序、温度、安全要求等要求。基本按照人、机、料 法、环的顺序编排，通过一般要求将本部分各个要素有机地联系起形成一个统一的整体。

1. 人员及机构

强调了TOFD检测的人员应了解钛及钛合金的基本知识，熟知钛及钛合金焊接接头工艺，熟悉钛及钛合金的声学特性和待检焊接接头的类型，掌握钛及钛合金焊接接头TOFD检测方法；TOFD检测机构应符合 GB/T 33488.1的规定。

1. 环境条件

对环境条件的规定主要考虑无损检测需在具体的场地和环境里实施，因此场地和环境条件对检测实施和检测质量的影响不容忽视。针对检测设备器材的性能以及钛及钛合金焊缝的检测要求，场地和环境包括但不限于强磁、 振动、灰尘和温度及湿度，主要通过三个方面影响检测质量：一是影响检测人员的身体和情绪乃至判断力;二是影响检测设备器材的性能;三是影响检测实施的环境条件。

1. 检测设备与器材

检测设备一般指与仪器直接相连的整体，包括仪器、探头、扫查装置和相关附件，附件是实现TOFD检测功能所需的其他物件；器材是指独立于设备以外的部分，如试块和耦合剂等。仪器和探头需要提供产品质量合格证和符合本部分要求的证明文件；明确了仪器和探头的各项性能具体要求；明确了对比试块的结构、类型和数量。规定了标准试块、对比试块和模拟试块的材质要求、试块尺寸和缺陷设置要求。

1. TOFD检测技术等级

本部分根据被检对象安全重要程度不同以及工艺措施的复杂程度，将钛及钛合金接头的TOFD检测分为 A、B、C 三个检测技术等级，分别从检测面、扫查面盲区和底面盲区高度控制、是否采用模拟试块验证工艺、扫查面和底面表面检测要求等 6 个方面进行了规定。其中，A 级要求最低，C 级要求最高。 本部分还对盲区高度超标时的补充检测提供了具体建议；对因结构的原因无法满足相应检测技术等级的要求也作了规定。

1. 检测工艺文件

检测工艺文件分为工艺规程和操作指导书。本条明确工艺规程和操作指导书应满足相关因素的具体范围或要求；本条还规定操作指导书在首次应用前应进行工艺验证，验证方式为，当检测技术等级为 A 或 B 级时，可采用对比试块进行，若被检工件壁厚不大于 35mm 且采用单通道检测时，还可在被检测工件上进行；当检 测技术等级为 C 级时，应在模拟试块上进行验证。

1. 检测程序

描述了无损检测准备、实施、报告的完整全过程，通过本条所述的各个环节将各个要素有机地联系起来，形成一个统一的整体。

1. 温度

钛及钛合金焊接接头TOFD检测，温度对检测用的耦合剂影响，系统设置和校准时的温度与实际检测温度之差会灵敏度，所以对温度作出了规定；无论被检工件的实际表面温度是否在0℃～50℃范围之内，检测系统设置和校准时的温度与实际检测温度之差均应控制在20℃之内。允许被检工件的表面温度范围超出 0℃～50℃范围，但此时一般应采用特殊探头或耦合剂，且操作指导书工艺验证时采用的探头耦合剂以及检测温度应与被检工件一致。

5、检测工艺参数的选择与设置

1. 检测区域的确定

正常焊接工艺的钛合金焊接接头，对其焊接接头解剖从端面进行测量发现实际热影响区宽度基本上在

10mm 以下，综合考虑到检测可实施性和效率，将检测区域的宽度为焊缝本身及焊缝熔合线两侧各10mm。

1. 探头选取和设置
   1. 通过仿真试验模拟表面开口缺陷与埋藏横孔缺陷的检出情况；

采用 TOFD 分别对钛合金材料制作不同厚度的三块对比试块进行检测，对以下缺陷进行CIVA 软件 TOFD 检测仿真：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 厚度 | 缺陷 1 | 缺陷 2 | 缺陷 3 | 缺陷 4 |
| 试块1 | 10mm | 上表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm | 距离上表面 5mm、直径为 2mm，长度为 20mm 的横孔 | 下表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm | —— |
| 试块2 | 28mm | 上表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm | 距离上表面 8mm、直径为 2mm，长度为 20mm 的横孔 | 距离上表面 14mm、直径为 2mm，长度为 30mm 的横孔 | 下表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm |
| 试块3 | 50mm | 上表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm | 距离上表面 10mm、直径为 2mm，长度为 20mm 的横孔 | 距离上表面 30mm、直径为 2mm，长度为 30mm 的横孔 | 下表面深度为 2mm  的开口刻槽，长10mm |

通过CIVA 仿真确定了对于钛合金材料的工件内缺陷可以通过 TOFD 检测出，仿真结果如下表所示：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 板厚 | 缺陷 1 | 缺陷 2 | 缺陷 3 | 缺陷 4 |
| 10mm | 上表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 10mm | 距离上表面 4mm、直径为 2mm，长度为 20mm 的  横孔 | 下表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 12mm | 下表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 8mm |
| 能发现，无法测量 | 能发现并测量深度 | 能发现并测量深度 | 能发现并测量深度 |
| 18mm | 上表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 8mm | 距离上表面 7mm、直径为 2mm，长度为 15mm 的  横孔 | 距离上表面 10mm、直径  为 2mm，长度为 20mm 的横孔 | 下表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 12mm |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 能发现，无法测量 | 能发现并测量深度 | 能发现并测量深度 | 能发现并测量深度 |
| 30mm | 上表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 10mm | 距离上表面 10mm、直径为 2mm，长度为 15mm 的  横孔 | 距离上表面 25mm、直径为 2mm，长度为 28mm 的  横孔 | 下表面深度为 2mm 的开口刻槽，长 10mm |
| 未发现 | 能发现并测量深度 | 能发现并测量深度 | 能发现但是不能测  量深度 |

* 1. 通过 CIVA 仿真试验模拟厚度 50mm 的不同埋藏横孔缺陷的检出情况；

50mm 厚的焊缝工件，内部从上到下添加 7 个横孔缺陷，分三个区对以下缺陷进行仿真：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 横孔直径 | 深度 |
| 缺陷 1 | φ2mm | 1mm(3mm) |
| 缺陷 2 | φ2mm | 6mm |
| 缺陷 3 | φ2mm | 12mm |
| 缺陷 4 | φ2mm | 20mm |
| 缺陷 5 | φ2mm | 24mm |
| 缺陷 6 | φ2mm | 35mm |
| 缺陷 7 | φ2mm | 48mm |

通过仿真确定了对于塑料材料的工件内横孔缺陷可以通过 TOFD 分区检测出，仿真结果如下表所示： 第一区：探头直径 3mm，频率 7.5MHz，带宽 80%，PCS=90mm，角度 60 度，可以发现 0mm-38mm 深度

的缺陷，近表面 1mm 的缺陷未法检出；软件将近表面缺陷深度调到 3mm 后，直通波有明显变化，反推测得缺陷下沿深度为 4.8mm，近表面缺陷可检出。

第二区：探头直径 6mm，频率 5MHz，带宽 80%，PCS=170mm，角度 45 度，可以发现 28mm-63mm 深度的缺陷。

第三区：探头直径 12mm，频率 3.5MHz，带宽 80%，PCS=170mm，角度 45 度，可以发现 63-98mm 的缺陷。

* 1. 西安优耐特容器制造有限公司在多个钛合金材料设备焊接接头施工过程中应用TOFD检测试验，发现了多个内部未焊透、夹渣等缺陷，并做了解剖验证。

结合仿真和试验结果以及被检测对象的特点，参照NB/T47013.10-2015《承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测》，给出了钛合金材料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α  （°） | 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 |

1. 扫查面和扫査方式的选择

当检测技术等级为 A 或 B 级时，一般情况下宜选择外表面作为扫查面，可使直接与介质接触的内表面的表面盲区较小，操作上也更易实施；弧面和非平面对接接头的扫查，应考虑盲区高度的大小，例如对曲率半径相对较小的纵缝检测时，从内壁检测可降低扫查面和底面盲区高度：扫查面的选择还应考虑有足够的操作实施空间，需检查表面是否存在影响扫查装置移动的接管或结构件等；在实际检测工作中应综合考虑上述因素，选择最适宜的扫查面。当检测技术等级为C 级时，应进行双面检测。

1. 确定初始扫査面盲区高度和检测方法

确定初始扫查面盲区高度的目的是在编制操作指导书时，定量了解非平行扫查(探头对中心与焊缝中心重合)的盲区大小，以选择补充检测的方式及考虑其覆盖深度，进而以确保满足规定的检测技术等级的要求。

当初始扫查面盲区高度大于 2mm 时，宜采用脉冲反射法进行补充检测。若选用脉冲反射法的爬波法，应在工艺文件中明确爬波探头的规格型号和布置方式，且应在扫查面盲区高度试块上至少对深度为 2mm 的侧孔进行工艺试验以验证其表面检出能力。

1. 确定初始底面盲区高度和检测方式

初始底面盲区高度按式（1）计算：

? （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。

当初始底面盲区高度大于 1mm 时，宜采用偏置非平行扫查。

1. 扫查步进设置

扫查步进值设置得越低，扫查方向上的分辨力越高，但数据量也越大。考虑到工件厚度较大时，对缺陷的验收也相对较宽松，适当提高扫查步进值不至于影响检测结果，同时可以避免数据过大。本条规定扫查步进最大值不超过 1mm。

1. 信号平均化处理

当随机噪声较大时，可以采用信号平均化处理提高信噪比，但过度平均化处理导致信号严重丢失，故本条规定一般情况下设定为 1， 最大平均化次数不大于 16。

1. A 扫描时间窗口设置和深度校准

本条规定当工件厚度不大于 35mm 且采用单检测通道时，可采用工件进行时间窗口设置，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；也可采用对比试块进行时间窗口设置和深度校准，但检测前需要按要求调节。

当在厚度方向分区检测时，应采用规定的对比试块设置各检测通道的 A 扫描时间窗口并进行深度校准，A扫描时间窗口至少应包含所需检测的深度范围，应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。关于分区覆盖向上覆盖，主要考虑扫查面盲区问题，如果向下覆盖，最上分区必然需覆盖较大范围，从而需增大 PCS,将导致初始扫查面盲区扩大，不利于 TOFD 检测;如向上覆盖，最上分区需要覆盖的范围较小，初始扫查面盲区也较小。实践中，在保证扫查的情况下一般使最上分区的探头对 PCS 尽量小，检测效果更佳。

6、检测

1. 扫查面准备

钛合金焊接接头表面影响扫查路径，图谱造成非相关显示；钛合金焊接接头表面应经外观检测合格。探头移动区表面应平整、干净无毛刺，便于探头的扫查，表面粗糙度 Ra≤12.5 µm。但如果焊缝表面有成型不良缺陷如较大的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；要求去除余高的焊缝，应将余高打磨到与邻近母材平齐。当扫查方式为平行扫查时，一般应要求去除余高。

检测前应在被检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，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。

1. 扫査

规定每次数据采集长度不应超过 2000mm。主要是考虑到若扫查长度太长时，当遇到耦合不好或数据丢失，因重新采集数据很麻烦，会导致某些检测人员采用局部回退方式补救而不是重新扫查，有时会产生数据丢失:另外，某些检测仪器显示的焊缝 TOFD 图像会自动压缩，不利于判断检测数据质量。

7、检测数据分析

1. 检测数据的有效性评价

TOFD 检测中比较常见的图像质量不合格现象主要有两个问题，一是 A 扫时间窗口设置应符合本部分 10.10要求；二是指直通波、底面反射波无明品非缺陷引起的突变且较为平直。这两个问题尤其是后者，对数据判读有较大影响，本条还规定了，相邻 A 扫描信号连续丢失长度不超过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。

1. 相关显示和非相关显示

TOFD 检测图像会采集超声波通过区域的所有信息，它是一个综合的反映，包括相关显示和非相关显示。相关显示是由缺陷引起的显示，这是我们关注的重点。从显示大类来分，相关显示分为表面开口型缺陷显

示和埋藏型缺陷显示。相关显示包含的具体缺陷有：夹渣、气孔、裂缝、未焊透、未熔合和其它焊接缺陷。由于 TOFD 技术的本身特点，目前要对具体缺陷性质进行判定存在较大难度，但是可以从缺陷引起的显示大

类进行数据判读和评级，这也是国内外 TOFD 检测标准通行的做法。

对开口型缺陷显示和埋藏型缺陷显示分别进行了细分，并对相关显示和非相关显示的记录和测定进行了规定。

1. 缺陷的位置及缺陷长度测定、缺陷深度测定、缺陷自身高度测定、缺陷偏离焊缝中心线位置的测定的

规定基本上参照 NB/T47013.10-2015《承压设备无损检测 第 10 部分：衍射时差法超声检测》

8、缺陷评定和质量分级

从安全性角度考虑，裂缝缺陷以及未熔合、未焊透等危害性缺陷是不允许的，均评为Ⅲ级。

对实际可能存在的相邻两个或多个缺陷显示（非点状)、点状显示、密集型点状显示和非点状缺陷显示等不同类型的缺陷显示分别进行评定和质量分级。安全角度考虑并充分考虑钛合金材料焊接的特点，对各个缺陷尺寸、数量等指标进行相应调准，相比较金属标准 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》要严格。

国际上 TOFD 检测标准不包括质量分级，一般由检测双方进行协商后确定。钛合金材料焊接制承压设备基本上都属于特种设备，因此需要按照特种设备的安全管理要求明确质量分级。

9、检测记录和报告

钛合金材料焊接制承压设备基本上都属于特种设备，因此检测记录和报告主要参照了特种设备行业的标准

NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》中有关规定。

# 三、涉及专利

无

# 四、预期达到的社会效益情况

《钛及钛合金材料制设备焊接接头衍射时差法超声检测方法》实施后，将是钛合金材料焊接制承压设备检验方法的有效及完整补充，对钛合金材料焊接制承压设备在进行 TOFD 检测方法时，起到了很重要的指导及规范作用。本标准是钛合金材料焊接制承压设备 TOFD 检测方法的基础性标准，制定和实施本标准，意义重大。

# 五、采用国际标准和国外先进标准情况

本标准制定时主要标准框架和结构参考了国家能源局行业标准 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》，并充分考虑钛合金焊接接头的特点进行起草。

# 六、与有关法律、法规和其它强制性标准的关系

本标准与我国现行法律、法规和其它强制性标准无矛盾。

本标准与其它类似标准的区别：无。

# 七、重大意见分歧的处理结果和依据

无重大意见分歧。

# 八、标准性质的建议说明

推荐性。

# 九、标准贯彻实施建议

为了更好的实施本标准，建议发布后由陕西省市场监督管理局标准化技术委员会组织宣贯会议，由本标准主要起草单位介绍标准指导思想和主要内容，来保证执行标准的正确性及提高钛合金材料焊接制承压设备制造行业的技术水平，规范和统一《钛及钛合金材料制设备焊接接头衍射时差法超声检测方法》很好的实施。

# 十、废止现行相关标准的建议

无。

# 十一、其它说明

无。

《钛及钛合金材料制设备焊接接头衍射时差法超声检测方法》标准编制组

2023.8.30