

TOFD 检测方法在水利工程焊缝质量检测中的应用研究

刘小艳

山东公用工程质量检测有限公司 山东 济宁 272000

摘要：通过对三种焊接检测手段的比较，即射线检测、标准超声检测以及 TOFD 检测，我们发现射线检测需要利用放射源，因此，实地检测时有着相当大的辐射危害。而标准超声检测则需要检测者具备良好的实地阅读数据的技巧以及丰富的检测经验，因此，它有可能导致遗漏或错误的结果。此外，它也无法精确地记录下所有的缺陷，因此，事后的缺陷评估基础往往难以得到保证。然而，TOFD 检测技术则没有辐射危害，只需扫描后就能够记录下所有的阅读数据。对于问题的识别，其效率极高。

关键词：TOFD；焊缝检测

Application Research of TOFD Detection Method in Weld Quality Detection of Hydraulic Engineering

Liu Xiaoyan

Shandong Public Engineering Quality Testing Co., Ltd., Shandong, Jining 272000

Abstract： Through the comparison of three welding testing methods, namely, X-ray testing, standard ultrasonic testing and TOFD testing, we found that X-ray testing needs to use radioactive sources, so there is a considerable radiation hazard in field testing. Standard ultrasonic testing requires the tester to have good field reading data skills and rich detection experience, so it may lead to missing or wrong results. In addition, it does not accurately record all defects, so the basis for post-facto defect assessment is often difficult to guarantee. However, the TOFD detection technology has no radiation hazard and can record all the reading data after a scan. For problem identification, it is extremely efficient.

Key words： TOFD; weld inspection

ndt 无损检测作为一种有效的工具，能够有效地保证零部件、设备和建筑的无损状态，所以它已经被广泛地运用于材质的持久性检测和尺寸的标注。各种策略各有其长处和短处，这主要取决于需要审查的物质、不连贯性的种类、物质环境等因素。因而，挑选出最恰当的策略是基于实际的使用情况。

一、研究的目的

虽然射线摄影（RT）在检查和识别焊缝部位的断裂方面得到了大量使用，然而，它所依赖的专门的安全步骤、构建射线摄影模型的耗时以及反馈机制均受到了纵向断裂的影响，因此，这并未能够对由此产生的问题进行准确的风险评价。所以，ut（超声波）已经被证明是取代 RT 的首选方案，原因在于其无需给操作人员带来任何损失，同时也能准确地测量出非连续的大小^[1]。ut 的一项重大突破就在于超声波衍射时差法（TOFD）的诞生。TOFD 的使用范围正在逐渐扩大，这主要是因为它能在高度稳定且误差较小的环境中迅速进行检测。通过对待检查的物体进行超声波束的倾斜照射，可以减少 RT 检查中的瑕疵，并且改善物体的尺寸不一致。通过将传感器的自动位移与信号数字化，我们有可能通过长期记录来进行自动监控。

我们的愿景是构建一个 TOFD 模式下的水利工程焊接品质自

动监控系统。这个工具有能力识别焊接部位、管道以及其他几种金属构造的瑕疵，并 ACK 其大小。我们希望降低对操作人员的干扰，增强实验的稳定性。通过对优质缺陷控制样品的审查，来评估设备的效能。

二、TOFD

TOFD 的主要目标是确定缺陷的大小，并记录其末端产生的信号的位置，也就是它们之间的时间差。因此，TOFD 对信号振幅的改变反应极为微弱。for TOFD 的传统配置包括一个发射传感器和一个接收传感器，它们都与焊接区域保持对齐，以便于覆盖所有关注的区域。

A 扫描方法代表了超音频信息的标准表现，其主要构成元素包括信息本身、振幅以及平均持续时间，这些都会被展现在超音频设备的显示屏中。将第一个脉冲的发射器与样本表面以下

的纵向波进行对应。如果没有中断，第二个电流将会变成后壁的反射。所有由非连续性触发的其他信号都会被标记在表面波与后壁回波中，这是因为它们各自标识了脉冲产生器与接收器之间最短和最长的可能通道^[2]。因此，上肢的信息传达速度超越了下肢，因此它们的信息交流是相对的。根据这些数据的飞行周期不同，我们有可能推算出不连贯的海拔（详见英国的标准 BS77061993）。一般来说，横向波动与后向波动是评估其它波动的反射时长的参考。

三、实验装置

TOFD 研发的水利工程焊缝质量自动化检测设备主要包括以下几个部分：一个由个人电脑（PC）操控的软件，它与超声波设备相连，同时也与电子系统（驱动器）和机械系统（扫描仪）相联系。

（一）机械系统

超声波传感器被安装在扫描器上，它能够与需要检测的部分实现最优的连接。为了简化操作，我们特别配备了一个内部的磁轮，这样就可以在任何可能的地点（包括倒置的地点）对铁磁结构进行检测。

（二）电子系统

电脑驱动程序是扫描仪的工作原理。我们对众多的电子电路设计进行了深入的探讨和审查，终于发现了一个最佳的选择：配备了可编程微控制器的驱动器。这提升了系统的性能，使其可以独立于操作系统。并行端口是实现 PC 与驱动程序间连接的方式^[3]。

（三）控制系统

利用软件进行超声波的实时数据采集以及扫描设备的定位。这个工具是基于 Borland C++builder 6 开发的，并且可以选择 1 个用于连接驱动程序的接口。2 个用于传输给电脑的超音频器材 3 决定了数据的传递速度。在输入全部的参数之后，用户能够替换传感器来确定最初的检测点，或者自己进行检测。

在执行探查任务时，我们采集到多个以 A 字头标识的超音频数据，然后借助这些数据构造出一个以 D 字头标识的影像。在执行探查任务时，我们采集到多个以 A 字头标识的超音频数据，然后借助这些数据构造出一个以 D 字头标识的影像。D 扫描是一种持续记录的方式，由几个 A 扫描构成，其中包含了在传感器和超声波束对应的位置上，产生的被测区域的纵向剖面图。

A 扫描与 D 扫描被用作控制软件展现结果的手段。A 扫描与 D 扫描被用作控制软件展现结果的手段。执行的审查过程中储存的数据能够随时被再次加载以便进行研究。执行的审查过程中储存的数据能够随时被再次加载以便进行研究。点击鼠标，就能在 D 扫描里挑选出 A 扫描。D-scan 的控制软件会在其上画一条蓝色的线，而 a-scan 则会在屏幕的左边展现。

（四）试件

aisl 1020 钢板制作出的各种试样，其厚度分别为 18mm 和 600mm。由于电火花的侵蚀，产生了各种各样的问题。这个处理流程确保了插入缺陷的尺寸准确性。因为每一个瑕疵的真实大小

都被妥善管理，所以我们能够对设备的效能和稳定性进行更优的评价。

这个试验样本专门用于评估校准和定径设备的稳定性和效率。将四个 10 毫米的小孔分别放置于左边，虽然它们的间距是 10 毫米，但是它们的深度却有所区别。我们在左侧挖了 10 个洞，每个洞的深度都是 10 毫米，但是它们之间的距离却有所不同。在 12mm 的区域，它的空间解析度已经达到了传感器的预期标准，然而 4mm 的区域却不及此标准。下一步，使用相同的样本可以帮助我们评估 SAFT（合成孔径聚焦技术）这种信号处理手段的效能和效益，进而改善后续的系统解决策略。

两块 19.05mm 的板子，它们的厚度分别是 19.05mm（3/4 英寸）和 600 mm，都被设计来生产另外一种试验样本。这两块板材是通过环形焊接和手工电弧焊（SMAW）技术进行精细拼装的。在焊接流程里，有些是有意为之的，比方说：没有完全融合、有漏洞、有空洞等。除了两个实验数据，所有的实验数据都是在工业过程中用于生产焊接管线的。

（五）检查

TOFD 在进行实验样本的检验过程中，采用的是自主研制的装置。AA 模块上安装了一个直径为 6 mm 的 5MHzMSW/QC/PC Krautkramer 传感器，其入射角度为 60°。通常，主要用于接触检测的耦合剂包括水、油、甘油、石油以及各种商业混合物。在这个任务中，我们使用的耦合剂是 SAE40。我们把 15 美元的 Krautkramer 超声设备与 PC 进行了连接。当传感器发生位移并开始焊接时，我们将对每 1mm 的区域执行 A 的检测。

四、TOFD 技术在水电站金属结构焊缝检测中的运用

（一）对于压力钢管与蜗壳焊缝的品质评估手段

依据现行规定，并参照 TOFD 技术的标准，施工单位负责首次自检，在完全自检合格后，由业主委员会指定的第三方进行复检，以下是自检和复检的具体步骤：

当全部的超声波检查（UT）工作都做好之后，我们会依照线性损伤的范围来执行 TOFD 的相同比率的更新检查。一类焊接的 100% 可以看作是一个比率，然后二类焊接的 50% 也可以看作是一个比率。此外，我们还将对相同数量的磁性颗粒实施一致性的监控。

蜗壳复检

根据 10% 的比例进行环形焊接以及纵向焊接的超声波探测，而根据 100% 的比例进行蜗壳拼接部分、舌形焊接以及过渡板焊接的超声波探测。对 TOFD 与磁粉的测试应该按照一类焊缝的 20% 与二类焊缝的 10% 作为标准。

自检压力钢管

在所有的超声波检查（UT）都已经做好的情况下，我们会按照线性损伤的范围来执行 TOFD 的相同比率的替换性检查。将一类焊缝的 20% 设定为标准，而将二类焊缝的 10% 设定为标准，并且按照相应的标准来同时监控磁粉。

复检压力钢管

按照 100% 的比率执行环形和纵向焊接的超声波检测。按照

100%的比率对压力钢管的拼接接头进行了超声波检测。在此基础上,对一、二类焊缝中的 TOFD 与磁粉的检测占 10%。

按照检测流程,首先是超声波检测,然后是磁粉检测,最后是 → TOFD 检测。

(二) TOFD 检测结果及分析

依照 TOFD 焊接检查的规定,目前已经进行的焊接检查涵盖了 60%的压力钢管以及 3 台蜗壳等。尽管 TOFD 的再次审查已经对一部分经过超声波检查符合规定的焊接部位进行了处理,但是仍然有一些超出规定的情况。经过解剖学的研究,我们发现其主要的潜在风险是未能完全融化、出现裂痕等。

例如,在审核 2 号蜗壳的过程中,因为它是在 2010 年 11 月到 2011 年 3 月期间完成的焊接任务,因此,建筑地点的环境状况相当糟糕,特别是连续 40 天的降雨量和冰冻天气给建筑的质量带来了极大的冲击。通过使用超声波对 2 号蜗壳进行了评估,结果显示其符合规定的要求,但是在 TOFD 的评估中,还存在 38 个未能满足规定的问题。尽管进行了超声波检查,但是这次的复查结果表明,其缺陷反射的强度还是相对较弱。尽管如此,根据 GB/T11355-89 的规定,只要达到 DAC+16d 的检测精度,点状缺陷的回波只会呈现出大约 5%的波动范围。我们在现场进行了解剖,发现有些裂纹缺陷的长度已经超过了 100mm。探讨其根源,主要有几个关键点:一般 A 类超声波探头仅可捕获反射波的数据,这些数据将被缺陷的光洁度、方位及形态所大大削弱。尽管 a 类超声波在检测面积型和体积型缺陷时,具有较高的准确性,然而,对于那些与声束方向相近的面积型缺陷,它们的检测效果却相当有限。TOFD 的工作原理是使用两个探头同时发送与接收,其中,探头主要负责接收衍射波的信息,这种信息并不会被缺陷的特性或者方向所干扰。由于这个原理,TOFD 的缺陷检测效果非常好。

(三) 经济评价

经验表明,TOFD 检测技术拥有众多的优点,如其对数据的解读和处理效果清晰、储存时间较长、检测过程迅速、发现率极高、能够进行交互式操作、反复性强,而且仅需执行常规的环境保护手段。TOFD 的监控优势如下:

利用该技术对基坑、厂房、大坝等的检测,完全可以避免射线探伤造成的停工 40d 的损失。

能够更精确的识别出未融化、裂痕等潜在风险。

能够将环境污染降至最低甚至消除,从而降低了对射线探伤的相关费用。

总体经济收益优秀。假设只有一台水电发动机,可以缩短 40 天的施工时间,那么 4 台发动机就可以提供 $64\ 510 \times 104\text{kW} \cdot \text{h}$ 的可用电力。如果我们以 6 的有效负载系数为基础,同时以 0.288 元 / $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的标准电价为依据,那么 4 台机组可以带来 1.86×10^8 元的财务回报。

五、结果与讨论

我们将对被火焰腐蚀过的样本两个滚动部分进行审核,其主要任务是寻找 a 部分的凹陷洞口,并且在 B 部分搜集相关数据。7

号和 8 号展示了每次检测结束后产生的 D 扫描,以及对对应位置的样品侧面图像,用于进行对比。能够辨认出插入样品中并经过检验发现的断裂。即使超声设备的时间解析度达到了最高,两个顶点的瞬息间的长度也很难准确估算。也有可能存在于接近表面的瑕疵,这些瑕疵可能出现在死区或者附近的地方。也可以出现横波和绕射波的重叠现象。比如,在进行检查时,B 部分没有发现接近表面(2mm 深度)的瑕疵。

D 扫描能够轻松地识别出两个间距更大的孔。需要特别强调的是,随着后续问题的缩小,解决这些问题变得更加困难。接下来,这个试验样本也能帮助评估 SAFT 的应用状况,从而在后续阶段提升系统的清晰度。两种方法均能识别出不足(未穿透)。

RT 的作用只限于识别出缺口的长度,但无法准确地衡量它的价值。相比之下,TOFD 产出的 D 扫描能够准确地判断出缺口的深浅及长短,原因是材质的块状结构的倾斜解决了 RT 在识别并标记与部件表面平行的缺口上的挑战。

六、结语

TOFD 检测技术在 2001 年左右开始在中国大规模地被推广和使用。tofd 检测技术相较于标准中规定的常规脉冲回波超声和射线检测方法,具备了操作简单、一维扫描速度快、对检测人员无辐射伤害、高缺陷检测率以及精确定位缺陷等优点。尽管如此,tofd 检测技术在对角焊缝以及 T 形组合焊缝的监控中,受到了发射与接收探头以及扫描设备规模的约束,还是有其自身的不足。因此,我们必须引入超声波检测这种新的监控手段。对于连接的焊点的审核,已经完全达到了在实地进行的检验的规范。

参考文献:

- [1] 史俊伟,刘松平.搅拌摩擦焊缝超声 TOFD 检测与缺陷评估方法[J].无损检测,2021,33(11): 1-3.
- [2] 盛朝阳,刚铁,黄江中.基于图像线性化处理的超声 TOFD 检测缺陷定位方法[J].无损检测,2021,33(07): 15-17.
- [3] 杨双羊,盛朝阳,路燕,等.谱熵分析方法在 TOFD 信号特征提取中的应用[J].无损检测,2020,36(11): 45-48.
- [4] 林树青,寿比南,郑辉,等.承压设备无损检测:NB/T 47013—2015[S].北京:新华出版社,2017.
- [5] 杨兴斌,曹麦对,刘雪芳.TOFD 检测中的伪缺陷图谱[J].无损检测,2019,35(03): 57-59.
- [6] 张树潇,谢雪.核反应堆厚壁压力容器焊缝 TOFD 检测缺陷高度分辨率探究[J].压力容器,2020,31(6): 64-69.
- [7] 韩相勇,姜自安.超声 TOFD 技术在管道环焊缝检测中的应用[J].无损检测,2019,30(1): 61-63.
- [8] 吴伟.超声波探伤在钢闸门检测上的应用[J].科技风,2018(20):199-202.
- [9] 韩相勇,姜自安,韩曙光,纪虎.超声 TOFD 技术在管道环焊缝检测中的应用[J].无损检测,2019(01):61-63.