

厚壁压力容器 TOFD 检测技术参数

郭永良¹, 郑 晖², 刘礼良², 袁丽华¹, 邬冠华¹

(1. 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘 要: 基于超声波衍射时差法 (TOFD) 检测原理和技术特点, 在分析厚壁容器 TOFD 检测存在盲区的基础上, 针对性提出采用分层检测以减小检测盲区的方法, 结合理论计算和试块试验测试结果, 提出和优化分层检测参数。根据参数优化的结果, 指导厚度 150 mm 厚壁焊缝的检测。检测结果表明, 超标缺陷检出率高, 缺陷性质判断准确, 缺陷尺寸测量精度高; 该分层检测参数设计方法可以推广应用于相关的厚壁容器检测。

关键词: TOFD; 厚壁工件; 表面盲区; 检测技术

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)05-0031-03

The Parameters of TOFD Detection of Thick-walled Pressure Vessel

GUO Yong-liang¹, ZHENG Hui², LIU Li-liang², YUAN Li-hua¹, WU Guan-hua¹

(1. Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Based on TOFD technique detection principle and technical characteristics, and on the analysis of dead zones existing in thick-walled vessel TOFD inspection, this article proposed layered detection methods to reduce the dead zone of inspection. Combined with the theoretical calculations and experimental test results of test block, tiered testing parameters were proposed and optimized. Detection of 150 mm thick weld was guided according to the results of parameter optimization, and test results showed that excessive defect detection rate could be obtained and the nature of defects could be more accurately determined with high accuracy of defect size. So the layered detection parameters design method can be applied to the thick-walled vessel associated testing.

Keywords: TOFD; Thick-walled test block; Dead zone in face; Detection technology

近年来,随着科学技术的发展,厚壁压力容器越来越多,对厚壁压力容器的制造和服役过程中的检测要求越来越高。厚壁压力容器焊缝检测常采用射线检测法等。然而射线检测成本高、焊缝检测效果差;而常规超声检测焊缝效率低、定量难、存在较大的盲区、重复性差^[1-3]。超声波衍射时差法 (TOFD) 技术对缺陷的定量精度比常规超声要高得多,通常可达到 1 mm^[4],而且 TOFD 对缺陷检出率

较高。这使得 TOFD 技术在焊缝检测和缺陷定量方面,极具应用价值。笔者在分析厚壁容器 TOFD 检测存在盲区的基础上,针对性提出采用分层检测以减小检测盲区的方法,结合理论计算和试块试验测试结果,提出和优化分层检测参数。

1 TOFD 技术检测原理

TOFD 检测技术是依靠超声波与缺陷端部的相互作用而发出的衍射波来检出缺陷并对其进行定量^[5]的。TOFD 检测与传统的超声检测完全不同,传统超声检测是依靠从缺陷上反射的能量大小(即幅值)来判断缺陷。而 TOFD 技术克服了常规超声探伤的一些固有缺点,缺陷的检出和定量不受声束

收稿日期: 2013-08-15

基金项目: 南昌航空大学研究生创新基金资助项目 (YC2012003)

作者简介: 郭永良 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事涡流阵列检测技术的研究。

角度、探测方向、试件表面状态及压力等因素影响。

TOFD 成像产生四种信号均以纵波传播,回波较强的直通波和底面波可作为被检区厚度范围的时间闸门或参考波,较之微弱的缺陷端部散射波和衍射波出现在两者之间。分别测出缺陷的上下端部衍射波之间的传播时间差以及上端部衍射波与直通波之间的传播时间差,即可通过计算得出该缺陷的自身高度和埋藏深度。

2 厚壁压力容器检测参数设计

近年来,壁厚 100 mm 以上且有高温、高压要求的反应容器越来越多,其壁厚最大已可达 350 mm^[6]。对于这一类特厚焊缝,目前仍缺乏有关内部缺陷检测精度的数据。相关研究者对这类焊缝进行了大量的对比试验研究,分别采用射线检测(RT)和 TOFD 技术厚壁压力容器检测试验结果如表 1。

表 1 RT 和 TOFD 技术对大厚壁压力容器检测试验结果

对比类别	缺陷检出率	测量精度	测高精度
RT	在 100, 180, 350 mm 试板的检出率分别为 78%, 58%, 52%	偏差约 4~8 mm	程序复杂, 实际很少采用
TOFD	在 100, 180, 350 mm 试板的检出率分别为 100%, 100%, 95%	偏差约 1~2 mm	偏差约 1~2 mm

由表 1 可知,TOFD 技术在大厚壁压力容器检验中具有检测能力强、缺陷定量精度高的优点。

就 TOFD 检测来说,用一组探头一次扫查完成检测的效率最高。但是对于厚板,一次扫查可能不能完全覆盖整个检测区域。对于厚板一般需要较大晶片尺寸和较小频率的探头。200 mm 以上焊缝检测时,一般选择探头角度 40°~50°,频率 2~5 MHz。晶片尺寸 10~20 mm。由声束半扩散角公式:

$$\sin\gamma = \frac{F\lambda}{D} \quad (1)$$

式中: γ 为半扩散角; F 为扩散因子(声压下降 12 dB 时为 0.7); λ 为波长; D 为晶片尺寸。

当选择探头角度 50°,频率 2 MHz,晶片尺寸 10 mm 时,半扩散角 λ 为 4.82°,所以在楔块中的有效声束角度为 13.24°~22.88°。

由楔块中的有效声束角度可得出在钢中的折射角公式:

$$\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta}{c_2} \quad (2)$$

式中: α 为楔块中的声束角; β 为焊缝中的折射角; c_1 为楔块中的声速; c_2 为钢中的声速。

由式(2)可求出钢的折射角为 32.47°~73.88°。

对于非平行扫查时,PCS(2s)的最佳选择为:

$$2s = \frac{4}{3D\tan\theta} \quad (3)$$

式中:2s 为探头间距; D 为焊缝厚度; θ 为探头角度。

所以当 D 取 150 mm 时,s 的值为 119.18 mm。

由上面求出的折射角度以及 1/2 PCS 值可求得声束覆盖的范围为 34.46~187.39 mm。这样在上表面就出现了一个 34.34 mm 的盲区。由于其他因素影响,盲区实际值比理论值可能还要大,因此在这一区域就会出现漏检。而分层检测就是解决这一问题的方法之一。

对于检测工件而言,是否分层以及分几层检测,是依据工件厚度来确定的。依据 NB/T 47013.10—2010《承压设备无损检测 第 10 部分:衍射时差法超声检测》标准,对厚度 100~200 mm 的工件进行分层检测,常用探头参数见表 2。

表 2 100~200 mm 分层检测常用探头参数

检测分区数 或扫描数	深度 范围	标称频率 /MHz	声束角 度 α /(°)	晶片直 径/mm
	0~t/5	5	70	6
3	t/5~3t/5	5	60	6
	3t/5~t	2.25	45	12.5

根据 2/3T 法则可以求出探头中心间距值(T 为检测区域深度值)。

当工件厚度为 150 mm 时,根据式(3)容易计算出第一、二、三层检测区域的探头中心间距值分别为:110,242.2,260 mm。

根据优化后的工艺,对该容器分三个厚度区域进行检测,采用三通道 100%TOFD 检测。0~29 mm 为第一区,用第一通道检测;29~88 mm 为第二区,用第二通道检测;88~147 mm 为第三区,用第三通道检测。TOFD 检测工艺参数设置如表 3 所示。

表 3 TOFD 检测工艺优化参数

通道数	频率 /MHz	晶片尺寸/mm	楔块角 度/(°)	探头中心 间距/mm	扫查增 量/mm	扫查 方式
1	5	6	70	110	1	非平行
2	5	6	60	242.2	1	非平行
3	2.25	12.5	45	260	1	非平行

由于检测时分三层进行检测,因此在设置时间窗口时,也应分三个窗口设置。在设置时间窗口时应注意:在设置第一通道的时间窗口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,第三通道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;各分区的 A 扫描时间窗口在深度方向应至少覆盖相邻检测分区在厚度方向上高度的 25%。设置灵敏度时,一般在对比试块上进行设置,将对比试块上反射体较弱衍射信号的波幅设置为满屏波高的 40%~80%,并在被检工件表扫查时进行表面补偿。

3 工程应用

检测的工件规格为 $\phi 6100\ \text{mm} \times 152\ \text{mm}$ 容器的对接环焊缝。检测中所运用的仪器设备有 omniscan mx TOFD 检测仪器一台,笔记本电脑一台,5 MHz 6 mm 探头 2 对、2.25 MHz 12.5 mm 探头一对,45°,60°,70°楔块各 1 对,编码器 1 只,扫查架 1 个,连接线若干。

3.1 实际检测验证

3.1.1 检测前准备

首先清楚被检对象的基本情况,并了解在该种材质工艺下需要检出的缺陷类型;再对被检工件进行准备工作,检测焊缝外观,余高与宽度;检查扫查面情况是否平整,一般要求机加工表面粗糙度不大于 $6.3\ \mu\text{s}$,喷丸表面粗糙度不大于 $12.5\ \mu\text{s}$;并确定检测区域,画出焊缝中心线和检测区域宽度。

3.1.2 深度校准

在检测前应对深度进行校准,校准试块如图 1 所示。校准第一通道时,选择试块中深度为 25 mm 的 $\phi 2\ \text{mm}$ 侧孔进行校准。将扫查架放置在对块试块上,并找到两侧孔的缺陷衍射波。在 A 扫描中,找到深度为 25 mm 的上端衍射波,上端衍射波深度为 24 mm,并将深度校准为 24 mm,并且误差不超过 1.47 mm;校准第二通道时,选择试块中深度为 62.5 mm 的 $\phi 3\ \text{mm}$ 侧孔进行校准。第三通道则选择深度为 112.4 mm 的 $\phi 6\ \text{mm}$ 孔进行校准。

3.1.3 灵敏度校准

检测前在图 1 所示的试块上对灵敏度进行校准。在对比试块上进行校准,第一通道灵敏度校准时,用深度 12.5,25 mm 的侧孔进行校准,将两侧孔中较弱衍射波的波幅设置为满屏的 80%,在扫查时进行表面耦合补偿;第二通道灵敏度校准时,用深度 62.5,87.5 mm 两侧孔进行校准,将两侧孔中较弱

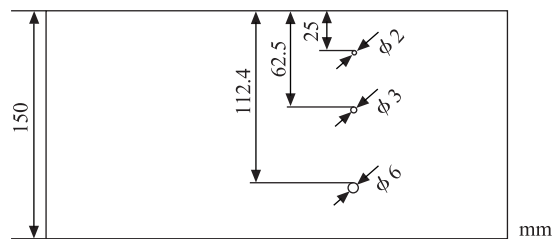
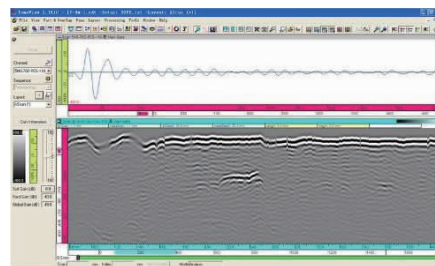


图 1 校准试块尺寸示意

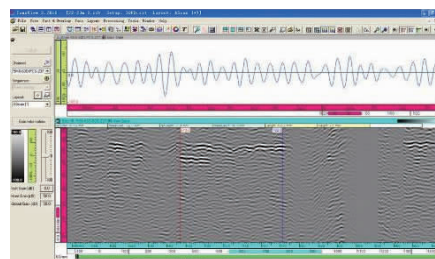
衍射波的波幅设置为满屏的 80%，在扫查时进行表面耦合补偿；第三通道灵敏度校准时，用深度 112.5,137.5 mm 的侧孔进行校准，将两侧孔中较弱衍射波的波幅设置为满屏的 80%，在扫查时进行表面耦合补偿。

3.2 检测结果

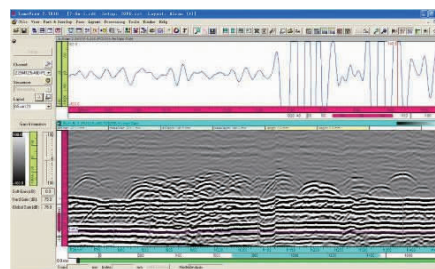
经现场检测发现多处超标缺陷。部分检测结果如图 2 所示。



(a) 层间未熔合缺陷



(b) 未熔合缺陷



(c) 夹杂与气孔缺陷

图 2 现场检测出的缺陷图

(下转第 72 页)

艺管线进行长距离检测时具有其技术优势^[12]。远场涡流检测是基于远场涡流效应的一种管道检测新技术^[13],它除了具有一般常规涡流的优点外,对铁磁性管道无需采用磁饱和等辅助方法,即可直接用内插式探头来检测管壁上的裂纹、腐蚀凹坑、磨蚀减薄等缺损,可以解决海洋平台工艺管线的在役快速探伤、测厚难题。

5 结语

随着海洋工程的装备制造业的大力发展,无损检测在海洋工程项目中的应用也越来越广泛。在分析海洋工程无损检测的特点的基础上,介绍了无损检测技术在海洋工程项目中的应用现状,总结了现阶段无损检测技术在海洋工程项目中的发展趋势,提出无损检测传统技术的完善提高与新技术的应用对确保海洋工程的安全可靠有着重要的意义。

参考文献:

- [1] DNV-OS-C401—2013 Fabrication and Testing of Offshore Structures[S].
- [2] DNV-OS-D101—2013 Marine and Machinery Systems and Equipment[S].
- [3] DNV-OS-E101—2013 Drilling Plant[S].

(上接第 33 页)

在图 2(a)所显示的缺陷长度 41 mm,深度 22.4 mm。该缺陷经返修后,发现是一个层间未熔合,并且旁边伴随着一些小气孔。图 2(b)中显示的缺陷为两段未熔合缺陷,经返修后,也证实为未熔合缺陷。图 2(c)中显示的缺陷深度为 116 mm,判定长度为 376.9 mm,经返修发现,其由夹渣与气孔组成。

当检测区域焊缝经过返修后,该处晶粒组织可能会发生变化;有时该处晶粒会变大,导致该处在图上可能会出现非正常的显示,如图 3 所示。

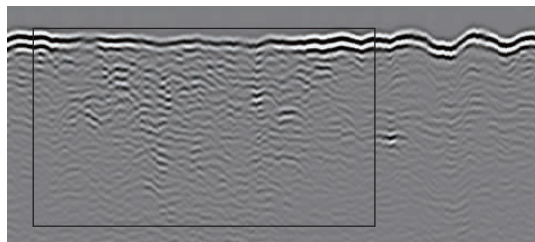


图 3 缺陷返修后的检测图

图 3 中方框内位置为返修区域。将该区域与旁边未返修区域对比可知,返修后区域内的晶粒噪声更大,因此在进行返修后的缺陷评判时,要注意该现

- [4] ISO 5817—2003 钢、镍、钛及其合金熔焊接头(不包括电子束焊接)缺陷的质量等级[S].
- [5] EN ISO 11666—2010 Non-destructive testing of welds-Ultrasonic testing-Acceptance levels[S].
- [6] EN ISO 23278—2009 Non-destructive testing of welds-Magnetic particle testing of welds-Acceptance levels[S].
- [7] EN ISO 23277—2009 Non-destructive testing of welds-Penetrant testing of welds-Acceptance levels[S].
- [8] 陆铭慧,程俊,邵红亮,等. 计算机辅助在 TKY 管节点焊缝超声相控阵检测中的应用[J]. 焊接学报, 2012(4):49-52.
- [9] 陆铭慧,邵红亮,刘勋丰,等. TKY 管接点焊缝形状模型在相控阵检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(12):13-15.
- [10] 陶红燕,张茂桐,郭强. TOFD 检验技术在海洋平台压力管道检测中的应用[J]. 新疆石油科技, 2012(4):80-81.
- [11] 单宝华,喻言,欧进萍. 海洋平台结构超声相控阵检测成像技术的发展及应用[J]. 海洋工程, 2005(2):107-110.
- [12] 王海波,贾巧玲,腾延平,等. 管道超声导波腐蚀检测技术应用研究[J]. 管道技术与设备, 2009(3):27-29.
- [13] 廉纪祥,沈跃. 管道远场涡流检测技术的进展[J]. 油气储运, 2004, 23(7):14-16.

象,以免造成误判。

4 结论

经现场实际应用结果证明,采用优化后的 TOFD 检测工艺对厚壁压力容器进行检测,能比较精准地测出各个层中的缺陷,而且对缺陷的定位较准确,能测出缺陷的位置和缺陷的长度。

参考文献:

- [1] 林立华. 压力容器无损检测技术[J]. 机械, 2007(34):1-3.
- [2] 刘松平,刘菲菲,李乐刚,等. 铝合金搅拌摩擦焊缝的无损检测方法[J]. 航空造技术, 2006(3):81-84.
- [3] 刘松平,刘菲菲,李乐刚,等. 搅拌摩擦焊缝变入射角超声检测方法研究[J]. 无损检测, 2006, 28(5):225-228.
- [4] 倪进飞. TOFD 检测技术基本原理及其应用探讨[J]. 广东电力, 2007(10):17-19.
- [5] 袁涛,曹怀祥,祝卫国,等. TOFD 超声成像检测技术在压力容器检验中的应用[J]. 压力容器, 2008(2):58-60.
- [6] 郭小联. 厚壁压力容器声源定位理论分析与试验研究[C]//第 11 届中国声发射学术研讨会. 杭州:[出版者不详], 2006.