

非平面工件对接焊缝 TOFD 检测工艺

肖 雄¹, 刘东梅²

(1. 江苏中宇检测有限公司, 南京 210012; 2. 徐州东方工程检测有限责任公司, 徐州 221008)

摘 要: 特种设备行业中常见的不等厚工件在组焊时, 会对厚的一侧进行削边处理, 而削边处理时对 TOFD 检测时探头的放置及声束角度都会产生影响。介绍了不同形状的非平面工件的对接焊缝 TOFD 检测工艺的设置; 通过仿真软件模拟探头声场对被检工件的覆盖及计算, 总结了 2 个简单实用的计算公式, 以帮助现场检测人员快速方便地对这类工件的对接焊缝进行 TOFD 检测。

关键词: 非平面工件; 不等厚; 削边; TOFD

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)05-0038-04

Non-planar Workpiece Butt Welds TOFD Inspection Process

XIAO Xiong¹, LIU Dong-mei²

(1. Jiangsu Zhongyu Nondestructive Test Co. Ltd, Nanjing 210012, China;

2. Xuzhou Oriental Engineering Testing Co. Ltd., Xuzhou 221008, China)

Abstract: For the more common unequal thickness workpieces welds in special equipment industries, the thick side will conduct chamfered edge, which shall affect the probes placement and the ultrasonic beam angle during TOFD testing. This article described the setting of non-planar workpiece butt welds TOFD inspection process, and summed up two simple and practical formula for the non-planar workpieces of different shapes to help people quickly and easily on-site testing the butt welds of such workpieces during TOFD testing by simulating and calculating the sound field of probes through using simulation software to cover of the workpieces.

Keywords: Non-planar workpiece; Unequal thickness; Chamfered edge; TOFD

随着超声波衍射时差法(TOFD)检测技术的广泛应用, 其一些技术难点也显现出来, 有些是由技术的局限性带来的难点, 如检测面的盲区、横向裂纹的检测等, 也有些是由于检测人员的经验不足带来的, 如缺陷的定性、定量、定位等, 还有一些是工件结构相对复杂带来的问题, 如非平面工件的对接焊缝、管座的对接焊缝等。

1 非平面工件对接焊缝坡口型式

非平面工件包括不等厚工件的对接、锥体与筒节的对接、法兰与筒节/直管的对接以及管道或筒节的纵缝(此类一般称为曲面工件)等, 其中比较常见的是压力容器中的不等厚工件的对接焊缝, 如封头

与筒体的焊缝。焊缝两侧母材常常是不等厚的, 厚的一侧母材一般都会削边处理, 其结构有以下两种形式: 单面削边(图 1(a))和双面削边(图 1(b))。其它的类似结构还有法兰与筒节/直管、锥体与筒节等部位。



(a) 单面削边

(b) 双面削边

图 1 单、双面削边坡口示意图

2 声场覆盖的仿真及计算

目前大多 TOFD 检测仪器的设置和测量计算都是基于探头在同一水平面对称放置的条件下进行

收稿日期: 2013-08-15

作者简介: 肖 雄(1972—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事超声检测和电磁检测新技术方面的无损检测工作。

的。在此条件下,一般将发射和接收探头的中心线对准焊缝的中心线即可完成非平行扫查,此时参数的设置按照相关标准的推荐方法设置^[1]即可。但是在对类似图 1(a)或图 1(b)的两侧不等厚的焊缝进行 TOFD 检测时,如按相关标准推荐的方法以及常用的工艺进行设置^[2-3],探头在焊缝中心线两侧对称放置时,探头中心声束交点则会偏离焊缝中心线位置,造成探头声束覆盖不足甚至漏检的可能。笔者根据多年从事 TOFD 现场检测的经验,通过仿真软件模拟探头声场对被检工件的覆盖及计算,根据实际情况总结了一些经验和计算公式。

采用超声仿真软件进行超声检测模拟可减少加工试块的成本,还可帮助相关人员更直观地了解检测过程及结果^[4]。CSSP diffraction simulator是一款简单的超声声场模拟软件,可以进行普通超声探头、相控阵超声探头的声场模拟计算,其应用界面如图 2。为了显示更直观和便于计算,设定一个焊缝工件,左侧母材厚度 80 mm,右侧母材厚度 50 mm,坡口角度 50° ,削边坡口角度一种为 30° ,一种为 16° ,用该软件分别模拟 5 MHz $\phi 6$ mm 探头使用 60° 纵波楔块和 70° 纵波楔块的声场。图 4(a)~(d)楔块角度全部都是 60° ,图 4(e)左侧楔块角度为 70° 。图 3,4 中虚线是理论计算所得 -12 dB 下扩散角值(扩散因子取 0.8,楔块声速 2.4 mm/ μ s),与软件仿真结果相比,该下扩散角值略微偏大,覆盖区域则会偏小。

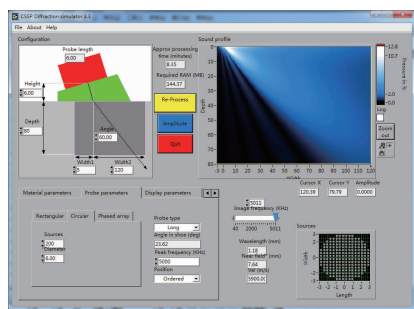


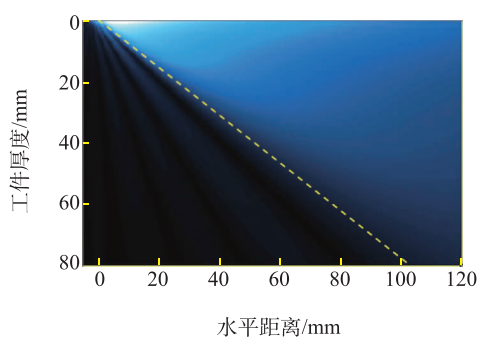
图 2 CSSP diffraction simulator 设置界面

表 1 是 5 MHz $\phi 6$ mm 探头分别使用 60° 和 70° 纵波楔块理论计算时, -12 dB 声束扩散角的范围以及声束所覆盖的下边缘宽度,和仿真软件的声场覆盖范围相比略微偏小一些。表 1 中负号表示在焊缝中心线对侧。

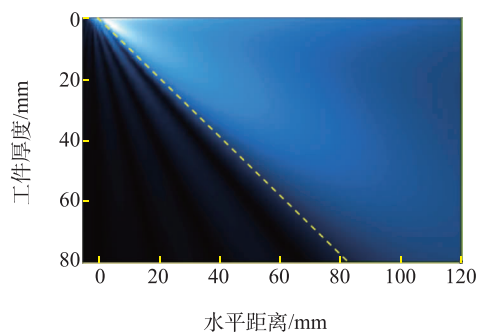
3 检测工艺设置

3.1 探头的选择

在图 4(a)~(d)工件上,探头的选择一般参照



(a) 70°



(b) 60°

图 3 5 MHz $\phi 6$ mm 探头使用不同角度纵波楔块的声场模拟

表 1 5 MHz $\phi 6$ mm 探头使用不同角度纵波楔块计算的声束扩散角及声束覆盖下边缘宽度

母材厚度/mm	楔块角/°	下扩散角/°	上扩散角/°	声束覆盖下边缘宽度 (-12 dB 单侧)/mm			
左:80	60	45.8	90	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)
	70	52.4	90	-24.6	27.4	25.1	14.5
右:50	60	45.8	90	图 4(e):22.8			
	60	45.8	90	6.1			

NB/T 47013.10—2010 中的表 1 进行。对于检测面焊缝两侧母材平面相差比较大的情况,在灵敏度满足要求的情况下,应按较薄的一侧母材厚度来选择探头参数。在图 4(e)工件上,由于探头放置于坡口斜面上,根据声场仿真的结果,考虑到楔块角度过小会影响声束对上表面的覆盖,因此其楔块角度不宜小于 60° 。在存在斜面的情况下,其楔块角度也应该参照此方法进行选择。

3.2 探头位置的选择

不同的工件结构,检测设置工艺的优先选择是不一样的,如图 1(a)中,应优先选择在平面上进行 TOFD 检测,只有当条件不具备或是工艺要求双面检测时,才需要在非平面的表面进行检测,此处只讨

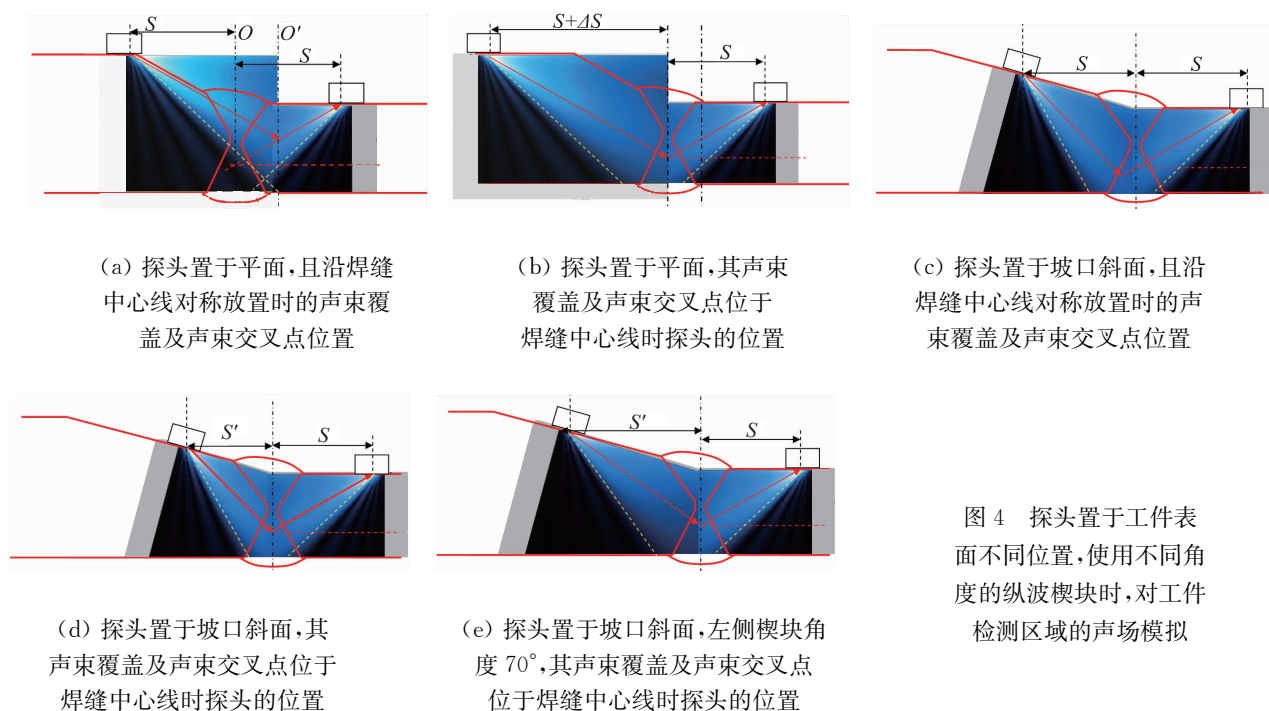


图 4 探头置于工件表面不同位置,使用不同角度的纵波楔块时,对工件检测区域的声场模拟

论在非平面表面检测的一些情况。

在实际情况下,不等厚工件的两侧母材厚度相差少则 2 mm,多则相差一倍板厚左右,其较厚侧母材削边的坡度各不相同,一般坡度约在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 间,因此 TOFD 检测时对探头的放置也无法统一规定,探头既可能放置在平面上,也可能放置在削边的坡面上,如图 5 所示。

3.3 探头中心距离的计算

TOFD 检测非平行扫查过程中,通常要确保探头中心距离的中心位置对准焊缝的中心线,其目的是为了保证探头声束能比较均匀地覆盖被检测区域。在平面工件上,此时探头中心声束的交叉点位置也是落在焊缝中心线上的;但是在两侧不等厚的工件上扫查时,为了保证声束的均匀覆盖和便于工艺参数的计算,同样应该使探头声束交叉点位置继续落在焊缝中心线上,此时探头在焊缝中心线两侧的位置不再是对称关系(图 5),因此需要根据探头声束交点的实际位置来确定探头位置,即探头中心距离($S+S'$)。对非平面工件,计算探头中心距离时应分别计算焊缝两侧探头至焊缝中心线的距离 S 和 S' ;一般是根据工件厚度(或分区厚度)来确定中心声束与焊缝中心线交点的深度位置 d ,先计算工件薄壁侧的探头距离 S (这与平面工件的计算方法相同),然后再以此深度 d 来计算工件厚壁侧的探头至焊缝中心线的距离 S' 。

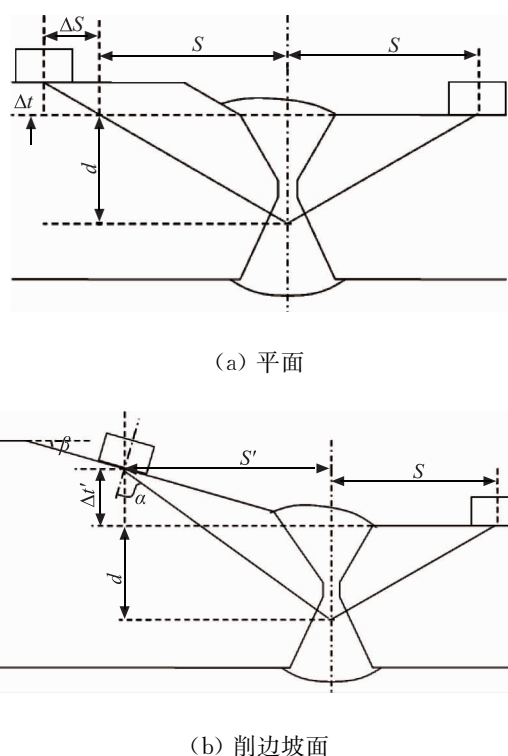


图 5 探头放置在较厚侧母材不同位置的示意图

图 5(a)的情况一般用在焊缝两侧母材厚度相差不大,或者厚侧母材的削边坡口角度比较大的情况下,此时探头可放置于两侧的平面上进行扫查。根据前面声场仿真及声束覆盖范围的计算结果,此时探头声束的覆盖相对比较均匀,其中心声束与焊

缝中心线交点的深度位置按工件薄壁侧厚度来计算。探头中心距离计算先得到一个初步的 L_{PCS} 值,根据图 5(a)所示的参数条件,得到以下计算:

$$\Delta S = \Delta t \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

$$L'_{PCS} = L_{PCS} + \Delta S \quad (2)$$

式中: ΔS 为探头中心距离的增加量; α 为探头在工件中的折射角; β 为工件削边坡度; Δt 为两侧工件厚度相差值; L'_{PCS} 为实际检测时使用的探头中心距离值; L_{PCS} 为薄侧工件探头中心距离的计算值。

图 5(a)这种情况的计算比较简单,已知焊缝两侧的厚度差 Δt 和楔块的角度 α 就可以得出厚壁侧工件上设置探头的偏移量 ΔS ,两个探头的楔块角度 α 相同,按照前面提供的案例参数,其 $L'_{PCS} = L_{PCS} + \Delta S = L_{PCS} + 30 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ = (115 + 52) \text{ mm}$,即其左侧探头距离中心线约为 109.5 mm,右侧探头距离中心线约为 57.5 mm。

图 5(b)的情况也比较常见,当工件两侧厚度相差较大,且厚壁侧工件削边坡口角度较小时,或探头中心距离设置较小时,都可能需将一个探头放置于削边坡面上。实际检测中,除了要考虑坡口表面平整度要求以及坡口角度的不均匀因素的影响外,在 TOFD 检测工艺的计算上还存在 2 个变量,一个是探头到焊缝中心线的距离 S' ,另一个是声束在工件中的折射角度,根据图 4(c)~(e)的仿真和表 1 的计算结果,三种方法都能满足声场覆盖要求,三者主要在灵敏度和分辨率方面会存在细微的差异。图 4(c)所示工艺更简单易用,检测时不需要改变探头中心距离值就能有效进行检测,理论上不论坡口角度 β 多少,其探头声束都应该能满足对被检区域的覆盖要求。图 4(d),(e)上采用不同角度楔块时计算相对复杂些,根据图 5(b)所示参数,得到以下计算结果:

$$t' = S' \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

$$S' = (t' + d) \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta) \quad (4)$$

$$S' = \frac{d}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha + \beta) - \operatorname{tg} \beta} \quad (5)$$

式中: t' 为削边坡面上探头入射点位置工件厚度的相差值; S' 为削边坡面上探头入射点位置至焊缝中心线的距离; β 为削边坡口角度; α 为探头在工件中的折射角; d 为声束交点的深度值。

式(5)中, d 、 α 和 β 值都是已知条件,因此可以计算出 S' 值,按照前面提供的案例参数, $S' = 33.3 \cdot \operatorname{tg}(70^\circ - 16^\circ) / [1 - \operatorname{tg} 16^\circ \cdot \operatorname{tg}(70^\circ - 16^\circ)] = 75 \text{ mm}$,即其左侧探头距离中心线约为 75 mm,右侧

探头距离中心线约为 57.5 mm。

因此在对不等厚工件进行 TOFD 检测时,根据削边坡口的实际情况分别选择式(2)或式(5)就可以计算出不同厚度工件(或分区)的实际探头中心距离值,得到的扫查结果与非平行扫查结果一致;此时如果有需要进一步做偏置的非平行扫查,只需要将两个探头同时偏移一定的距离即可,这与平面工件的偏置非平行扫查做法相同。

4 深度测量

TOFD 检测中探头中心线偏离焊缝中心线时,会对缺陷定位和测量产生误差^[5]。在对不等厚工件的 TOFD 检测数据进行分析测量时,由于两个探头不在同一水平平面上,且实际探头中心距离的中心与焊缝中心线也不再重合,目前 TOFD 软件还没有此类变量的设置,直接利用软件测量会存在一定的测量误差。因此,实际测量此类数据时,一般可以采用直通波与底波两点校准的方法,固定工件声速和楔块的延迟时间,重新计算一个虚拟的探头中心距离值(参考值),以此来测量缺陷深度位置,可以减小部分误差值,如果再能考虑实际探头中心距离的中心与焊缝中心线位置的偏移量,重新人工计算缺陷深度位置,还能减小部分误差值,测量结果会更接近实际值。

5 实际应用案例

某公司制造的一台产品,其中一条焊缝两侧母材分别是 42, 24 mm,坡口参数满足图 3 探头放置的条件,因此用式(2)很快就可以算出实际探头中心距离应该为:

$$(42 - 24) \cdot \operatorname{tg} 60^\circ + 24 \cdot 2 \cdot \frac{\operatorname{tg} 60^\circ}{3} = 86 \text{ mm}$$

其中左侧(厚壁侧)探头到焊缝中心线的距离应该为 58 mm,右侧探头到焊缝中心线的距离应该为 28 mm。按照上述探头中心距离的设置进行扫查的结果如图 6 所示,缺陷的检测效果与其它对接焊缝的检测效果看不出差别。

6 结语

笔者介绍了不同形状的非平面工件的对接焊缝 TOFD 检测工艺的设置;通过仿真软件模拟探头声场对被检工件的覆盖及计算,总结了 2 个简单实用

(下转第 45 页)

所测试件的磁场强度在一定程度上有所增强。

(2) 渗碳层厚度与矫顽力大小基本成线性关系。将轴向和环向试验数据分别拟合后得到下式:

$$y = ax + b \quad (1)$$

式中:环向 $a=0.49, b=194.2$; 轴向 $a=0.52, b=257.5$ 。

3.3 声发射衰减测试分析

(1) 虽然声发射检测的目的是为了实现长距离炉管的检测,但根据理想声衰减模式,可知在距离传感器布置点 300 mm 范围内的衰减梯度最大,故试验采用 300 mm 的样管是可行的。

(2) 所取试件总长为 300 mm,故在 300 mm 处进行标准断铅时,虽进行一些处理,但仍没有消除断铅时一次波与端面反射二次波之间叠加引起的幅值上升的可能性,如图 3 中显示的渗碳层厚度为 0, 990 μm 试件的声衰减曲线端部上翘的现象。

(3) 不考虑距离传感器布置点 300 mm 处端部上翘现象的影响,在距离传感器布置点 200 mm 范围内,声信号衰减程度随渗碳层厚度的增加而减缓(如图 3 所示)。

(4) 由传感器布置点附近距离传感器布置点 100,200 mm 处的声信号幅值可知,四种试件在同一距离的幅值变化范围分别为 1,2.5,2.0 dB,考虑到误差因素,可认为目前的渗碳层厚度不会引起声信号的显著变化。

4 结论

(1) 经渗碳处理后的炉管,其组织形态和磁场强度与未经渗碳处理的炉管相比有较明显的变化。

(2) 对于单一强渗碳组织,渗碳层厚度与矫顽

力大小呈简单的线性关系。

(3) 短时强渗碳引起的组织变化及磁场强度增强并未加快声信号的衰减,在一定程度上起到了减缓的作用。

(4) 短时单一强渗碳不会引起开裂等失效形式,也不会引起声信号的显著衰减。

参考文献:

- [1] 林学东,孙源. 乙烯裂解炉管材料高温渗碳行为研究[J]. 机械工程材料,1994,18(6):28-30.
- [2] 关家钺. 裂解炉管渗碳损伤的研究[J]. 石化技术,1997,4(4):216-220.
- [3] 王富岗,王焕庭. 石油化工高温装置材料及其损伤[M]. 大连:大连理工大学出版社,1991.
- [4] KHODAMORAD S H, HAGHSHENAS D, REZAIE H, et al. Analysis of ethylene cracking furnace tubes[J]. Engineering Failure Analysis,2012(21):1-8.
- [5] SHINOHARA T, KOHCHI I, SHIBATA K, et al. Development of nondestructive technique for measuring carburization thickness and a new carburization-resistant alloy[J]. Materials and Corrosion,1986,37(7):410-418.
- [6] STEVEN K J, TACK A J, THOMAS C W, et al. Through-wall carburization detection in ethylene pyrolysis tubes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2001,34(5):814-822.
- [7] VAIDYANATHAN S, MORORTH V, JAYAKUMAR T, et al. Evaluation of carburization depth in service exposed ferritic steel using magnetic Barkhausen noise analysis[J]. Mater,1998,56(3):449-452.
- [8] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 中国劳动社会保障出版社,2008.



(上接第 41 页)

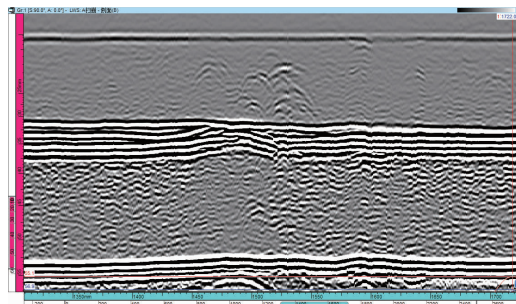


图 6 非平面工件对接焊缝 TOFD 检测结果

的计算公式,以帮助现场检测人员快速方便地对这

类工件的对接焊缝进行 TOFD 检测。

参考文献:

- [1] 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[S].
- [2] 孔令昌. TOFD 检测技术及其工艺参数设置[J]. 无损检测,2010,30(7):549-550.
- [3] 刘红霞. TOFD 检测中相关工艺参数计算[J]. 技术与市场,2012,34(4):23.
- [4] 强天鹏,肖雄,李智军,等. TOFD 技术的检测盲区计算和分析[J]. 无损检测,2008,30(10):738-741.
- [5] 万林青,毛民. TOFD 检测中心线偏离对检测结果的影响分析[J]. 中国化工装备,2011(5):23-25.