

# TOFD 技术在薄壁堆焊层裂纹缺陷检测中的应用

刘晴岩<sup>1</sup>,郝以运<sup>1</sup>,张 健<sup>2</sup>,张 伟<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院 承压系统安全科学教育部重点实验室,上海 200237;  
2. 上海锅炉厂有限公司,上海 200245)

**摘要:**研究了薄壁堆焊层裂纹类缺陷的 TOFD 检测技术,讨论了裂纹类缺陷的 TOFD 检测特征,分析了不同角度探头和不同探头间距检测结果的影响。结果表明,TOFD 技术可以检测到表面下 3~10 mm 内的垂直裂纹,结合 A 扫描信号和 B,D 扫描图像的特征,能够有效地对裂纹状缺陷进行识别、定位和定量,为堆焊质量评价提供可靠准确的依据。

**关键词:**超声衍射时差法;堆焊层;裂纹缺陷

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2010)05-0364-03

## Inspection of Overlay Welding Crack by TOFD Technique

LIU Qing-Yan<sup>1</sup>, HAO Yi-Yun<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education, School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;  
2. Shanghai Boiler Works Ltd, Shanghai 200245, China)

**Abstract:** The overlay welding cracks were inspected by TOFD technique. Detecting features of TOFD of cracks were studied, and the influences of angle and distance of probe pairs on detecting results were analyzed. The results showed that TOFD technique could detect vertical cracks correctly located 3~10 mm under the surface. Combined with A-scanning signals, B-scanning and D-scanning images it could identify, locate and quantify crack-like defects effectively, and provide reliable and accurate information for the estimation of the quality of overlay welding.

**Keywords:** Time of flight diffraction technique; Overlay welding; Crack

## 1 堆焊层裂纹缺陷

堆焊是提高材料表面性能的重要途径之一,其目的不是为了连接零件,而在于提高零件表面耐磨、耐热和耐蚀等方面性能。堆焊的结构形式在压力容器中得到广泛的应用。

堆焊过程中所产生的缺陷按其出现部位不同可分为四种:① 表面缺陷,包括裂纹、气孔和夹渣等。② 堆焊层内的缺陷,一般为夹渣和未熔合。③ 堆焊层与母材的未结合。④ 堆焊层下母材热影响区再热裂纹,取向基本垂直于母材表面。笔者将对第四种缺陷,即堆焊层与母材热影响区内的热裂纹类

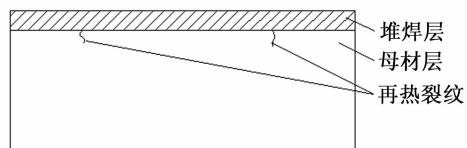


图 1 堆焊层下再热裂纹示意图

缺陷进行检测方法研究,其示意图如图 1 所示。

研究对象为用于压力容器的奥氏体不锈钢堆焊结构,即在碳钢母材一侧堆焊上奥氏体不锈钢或镍基堆焊层所形成的复合钢板。堆焊层的厚度一般为 3~14 mm<sup>[1]</sup>,笔者关注的对象为 4~6 mm 厚度的堆焊层堆焊后所形成的缺陷。对于厚度<8 mm 的堆焊层区域,常规超声检测灵敏度较低,同时该检测区域一般又处于超声波的近场区或盲区,声波对该区域中反射体的反射规律难以确定。因此对于该区

收稿日期:2008-11-15

作者简介:刘晴岩(1961—),男,副教授,从事无损检测技术的应用研究和教学研究。

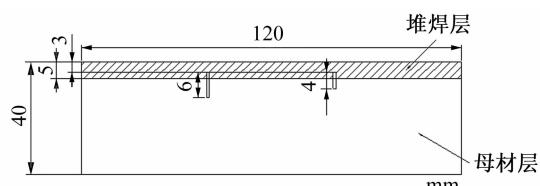
域的缺陷难于检测,缺陷的准确定位和定量也较为困难。基于以上原因笔者选择了 TOFD 技术进行垂直裂纹的检测研究。超声 TOFD 检测技术对此类裂纹的检测,是其它检测方法无法比拟的<sup>[2]</sup>。

## 2 模拟试块的制备

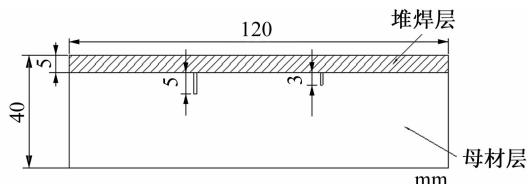
模拟试块为两块相同材料及尺寸的堆焊试块。试块母材为普通碳钢,堆焊层为厚 5~7 mm 的奥氏体不锈钢,尺寸均为 120 mm×15 mm×40 mm。利用电火花、线切割在试块堆焊层侧分别加工了 2 个不等高度、宽度为 0.2 mm 的人工线状裂纹,模拟堆焊后的再热裂纹缺陷。模拟裂纹的高度及位置尺寸详细参数见表 1 及图 2。

表 1 模拟裂纹几何尺寸

模拟裂纹编号	实际高度/mm	上端埋深/mm	下端埋深/mm
1(试块 A)	6	3	9
2(试块 A)	4	3	7
3(试块 B)	5	5	10
4(试块 B)	3	5	8



(a) 试块 A



(b) 试块 B

图 2 试块人工裂纹示意图

## 3 试验及讨论

### 3.1 试验系统及扫查方式

TOFD 检测系统是以 LabVIEW 为开发平台,完成超声采集卡的二次开发,使采集卡与个人 PC 机结合,完成检测信号采集、存储和图像显示等工作。TOFD 检测所用探头的典型标称角度有 35°, 45°, 60° 和 70°, 笔者选用 45°, 60° 和 70° 的探头对缺陷进行了检测。以下图像皆为 45° 探头所测。

试验采用手动扫查,沿试块上表面对缺陷进行了 B,D 扫描。和 D 扫描图像相比较,B 扫描图像能

给出弧状的上端衍射信号,为缺陷类型的定性、定量提供了信息;而 D 扫描时两探头和缺陷上端的位置相对固定,只能从固定角度接收衍射波,提供的信息单一。因此,如根据 D 扫描图像对缺陷进行定位定量会产生误差。为了准确定位缺陷的位置及定量缺陷尺寸,并考虑试块的几何尺寸,主要采取了 B 扫描。B 扫描示意如图 3 所示。

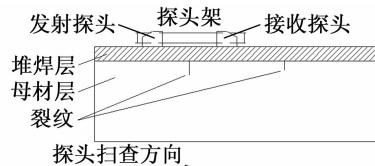


图 3 B 扫描示意图

### 3.2 缺陷检测及结果讨论

下文将通过制备的模拟裂纹试块、TOFD 探头和二次开发的检测系统来检测裂纹缺陷。检测时,利用机油作为耦合剂。系统检测参数:延迟 11 μs,采样频率 100 MHz。

首先用 45° 探头对试块 A 进行检测,依据中夹角=120° 时有最佳检测效果<sup>[3]</sup>,此时缺陷 1,2 所对应的最佳 2S 值分别为 17.3 和 13.8 mm。沿试块上表面选择不同的 2S( $13.8 \text{ mm} \leq 2S \leq 17.3 \text{ mm}$ ) 值进行多次 B 扫描,寻找对两缺陷的最佳效果 2S 值。经采集得知当 2S=15.5 mm 时效果最好,图 4 即为 2S=15.5 mm 时沿试块上表面 B 扫描结果。由于试块较厚而检测重点在于薄壁堆焊层,故在扫描图像采集时重点关注了堆焊层附近的图像。

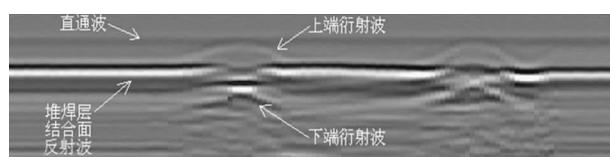


图 4 45°探头对试块 A 人工裂纹的检测图像

图中最上端的暗灰色扫描带为直通波,黑白分明的扫描带为堆焊层与母材层结合面的反射波。由扫描结果可见缺陷 1 的上端有明显的弧状衍射波,下端有清晰的衍射波。缺陷 2 的上、下端都有明显的弧状衍射波。结合 A 扫描图还可发现由于缺陷 1,2 距离检测面很近,直通波传播的声能量部分被裂纹缺陷反射,导致直通波幅值的下降;缺陷 1,2 的上端衍射波弧顶位置信号和直通波混叠幅值相消。但是,通过合理的信号处理的手段可以有效地区分这种混叠的波形<sup>[4]</sup>。

弧顶位置和侧向波的时间差  $\Delta t$  包含了裂纹缺

陷端部的埋深信息。弧顶在图像中的横向位置包含了缺陷在试件中沿着B扫描方向的位置信息。通过计算,可以准确定位裂纹缺陷在试块中的位置。

由于缺陷1、2上端埋深相同,而缺陷1的高度大于缺陷2的高度,在扫描图中表现为上端弧状衍射波相同,但缺陷1下端衍射波较缺陷2明显且位置较深,表明缺陷1、2均可检出但当缺陷愈大时或距探测面愈远时愈易于检测,与检测理论相一致。

图5为用45°探头对试块B进行检测的B扫描图像,探头间距为 $2S=21\text{ mm}$ ,沿试块上表面扫查。可见堆焊层结合面反射波清晰明了,缺陷3、4的上、下端弧状明显、衍射波清晰、相位关系明了。上端衍射波和直通波相位相反;下端衍射波和直通波相位相同。3、4号裂纹图像均能清晰反映该裂纹特征。

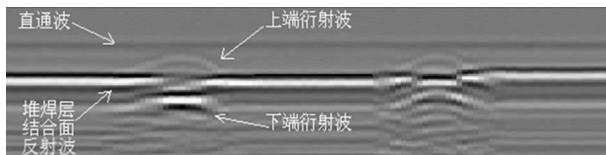


图5 45°探头对试块B人工裂纹的检测图像

比较图4和5可知其相同点:两幅图都能清晰扫描出堆焊层结合面,同时也都能扫描出要检测的缺陷且端点弧状波形明显。当裂纹长度增加时更易于被检测到且图像端点弧状波形清晰,这时通过清晰的弧顶位置计算出的裂纹高度会更接近裂纹缺陷实际尺寸。

不同之处在于图4缺陷较图5缺陷接近上表面,图5缺陷下端埋深比图4深,图5中的缺陷高度小于图4中的高度。对比图像可知图5更能反映裂纹特征,表明缺陷距上表面的距离比缺陷本身的高度对检测的影响要大,也即越接近上表面检测难度愈大。图4中的上端点弧状波形与直通波相叠加,而图5中的上端点弧状波形独立存在。计算裂纹高度时,图5中的上下两弧顶位置计算出来的裂纹高

(上接第363页)

(2) 常规超声波对层间结合处的反射波会掩盖焊趾横向裂纹的回波。

由于相控阵技术的应用还比较少,在国内检验检测领域还没有一个成熟统一的标准,因此,在实际检测中,可以将相控阵技术与相对成熟的常规超声技术相结合。采用JB/T 4730—2005作为检测标准,利用常规超声技术来对相控阵检测发现的可疑

度会更接近实际值,因为裂纹高度的计算结果依赖于图像中缺陷边缘处的清晰程度,而此时的裂纹埋深较深,波形受直通波的影响减小。同时,由于裂纹愈加远离盲区,波形变得更加明显清晰。

#### 4 总结

通过以上对模拟裂纹试块的检测可以看出,采用TOFD技术检测堆焊层下母材裂纹的图像清晰、直观、易分辨;可以检测到表面下3~10mm内的垂直裂纹,能为堆焊质量评价提供比较可靠准确的信息,具有实用价值。总结如下:

(1) 对薄壁堆焊层下典型的裂纹缺陷的特征进行了分析和研究,提出了用TOFD技术检测裂纹状缺陷,并进行缺陷识别、定位和定量的设想。

(2) 通过采用TOFD方法及45°探头检测可知,能够准确、可靠地检测出薄壁奥氏体堆焊合金表面下3~10mm内的垂直裂纹,拓宽了JB/T 4730.10《承压设备无损检测 第10部分:衍射时差法超声检测》报批稿所规定的材料为低合金钢及工件厚度≥12mm的应用范围。

(3) 为了提高检测精度,可采用高性能窄脉冲探头;同时也可通过后图像处理的方法改善图像,以降低检测误差。

#### 参考文献:

- [1] 许遵言. 不锈钢及镍基堆焊层厚度测量[J]. 锅炉技术, 2002, 33(3): 17—20.
- [2] Mihara T, Otsuka Y, Cho H, et al. Time of flight diffraction measurement using laser ultrasound[J]. Experiment Mechanics, 2006(46): 561—567.
- [3] 李衍. 超声TOFD原理和方法要领[J]. 无损检测, 2007, 29(2): 88—93.
- [4] Honarvar F, Sheikhzadeh H, Moles M, et al. Improving the time-resolution and signal-to-noise ratio of ultrasonic NDE signals[J]. Ultrasonics, 2004(41): 755—763.

处进行复验。在检测中、检测完成后对检测中采集的数据进行全面的形状、尺寸和性状解释与评价。

#### 参考文献:

- [1] 程晓阳, 康纪黔. 多层包扎式容器环焊缝超声波探伤试验研究[J]. 无损检测, 2002, 24(3): 110—113.
- [2] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 69—71.