

TOFD 探头性能测试及其衍射特性的研究

吴军芳, 滕永平, 张 娜

(北京交通大学 理学院, 北京 100044)

摘 要:通过大量的衍射时差法(TOFD)检测试验,发现检测过程中探头发射的超声波在工件表面的入射点会随着探头间距的变化而移动,并得出探头的折射角会随着探头间距的增大而增大,同时探头的前沿距离和延迟时间变化不大的结论。另外,用 TOFD 对不同缺陷进行检测,记录了超声波在缺陷端部产生最大衍射效率时对应的探头折射角。试验结果表明该实际折射角大约在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,与探头的标称折射角没有必然的联系。

关键词:超声衍射时差法;探头性能测试;折射角

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)02-0064-03

A Research on Diffraction Characteristics of TOFD Probes by Performance Testing

WU Jun-fang, TENG Yong-ping, ZHANG Na

(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The incidence point of probe changed due to the variation of the distance between two probes while TOFD(time of flight diffraction) method was used. It was concluded by sufficient experiments that the refraction angle of probe enlarged while the distance between two probes increased. Meanwhile, the front distance and delay time of probe changed in an extent which could be neglected. Different flaws were tested by TOFD method to get the refraction angle of probe for the highest diffraction efficiency of ultrasonic waves from the tip of flaw. It was shown by tests that the actual refraction angle of probe was approximately 70° to 80° , and it was not affected by the labeled refraction angle.

Keywords: Ultrasonic time of flight diffraction technique; Probe performance testing; Refraction angle

衍射时差法(TOFD)是一种新型超声无损检测方法。TOFD 主要根据缺陷端部产生的衍射信号之间的时间差对缺陷进行定位和定量。由于其具有检测速度快、定量精度高、定位准确和可确定缺陷尺寸等优点^[1~3],广泛应用于焊缝检测。超声波探头作为检测系统中重要组成部分,其性能好坏直接影响检测的精度和准确性,所以有必要对 TOFD 探头的性能进行研究。笔者设计加工了几组探头和试块^[4~7],通过大量试验,对探头的折射角、前沿距离和延迟时间等性能及其衍射特性进行了分析研究。

1 TOFD 探头的设计制作

探头作为检测中发射超声波的器件,直接对检测结果产生影响,所以应该根据检测对象选择合适

的探头。考虑到工业常见焊缝厚度在 20 mm 左右,应选择标称入射角为 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 的探头。而且 TOFD 检测所用探头为宽声束探头,所以选择小晶片。探头采用常用 PZT 压电晶片,延迟块分别采用两种声速不同的有机玻璃来制作。共加工三组探头,每组两个,标为 1 号和 2 号。具体参数见表 1。

表 1 探头参数

组号	频率 MHz	晶片直径 mm	标称角度 ($^{\circ}$)	斜楔声速 km/s
1	5	10	60	2.24
2	10	6	60	2.68
3	10	6	70	2.24

2 试块的设计制作

试验所用试块共两组,采用厚度为 20 mm 的

20 钢制作,具体尺寸见图 1 和图 2。每组试块加工一种人工缺陷,分别为不同深度的平底孔和横通孔,模拟点状和条状缺陷,分别用来研究探头入射点随探头间距的变化规律和超声波在缺陷端部产生最大衍射效率时探头折射角的变化规律。平底孔深度为 18.5,18 和 10 mm, s 分别为 10,40 和 80 mm。2 组试块说明见表 2。

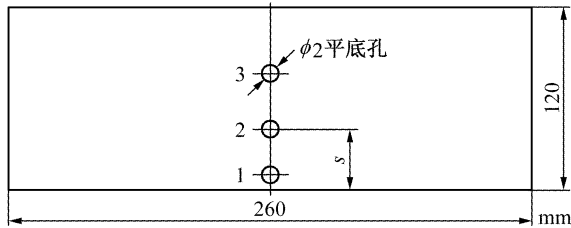


图 1 1 组试块尺寸

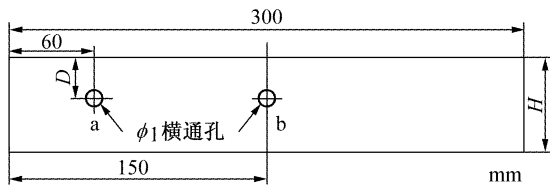


图 2 2 组试块尺寸(共四块)

表 2 2 组试块参数 mm

编号	试块宽度 H	缺陷	孔深	探测方法
1	18	a	16	单面
2	26	a	12/14	双面
3	30	b	6/24	双面
		b	10/20	双面
4	38	b	28	单面
		b	32	单面
		a	8	单面

试验所用仪器为基于 PC 机的插卡式超声波设备。采用的板卡为 SUSC880 超声波成像界面卡^[8]。该界面卡具有发射强度高、接收带宽宽、脉宽和阻抗可调等特点,完全能够满足 TOFD 检测的要求。

3 TOFD 探头性能测试

由于 TOFD 采用的是一对宽声束斜探头,所以在检测过程中的任意时刻,作用在不同深度缺陷上的是超声波束的不同部分,从而可以同时检出同一个缺陷的上端和下端。同理,对同一个缺陷,若探头间距不同,也会是超声波束的不同部分传播到其端部并产生衍射,因此可以想象,产生衍射的超声波在工件界面的人射点是变化的。也就是说,探头的实

际折射角、前沿距离和超声波在斜楔内的延迟时间会随着探头间距的变化而变化。

为了精确地确定探头的入射点,从而提高检测精度,笔者编写了一个程序,可以根据缺陷和探头的相关尺寸求出探头的入射点,算法原理见图 3。

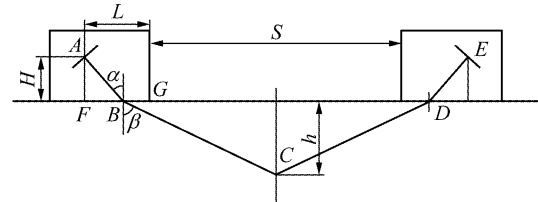


图 3 探头入射点计算原理图

- A, E——晶片中心点 B, D——所求探头实际入射点
- C——缺陷端部 F——晶片中心点在检测面上的投影点
- G——探头前沿 H——晶片中心的高度
- L——晶片中心距晶片前沿的距离 S——探头间距
- h——缺陷深度 α ——超声波入射角 β ——探头折射角

图 3 左侧为发射探头,右侧为接收探头,超声波沿 ABCDE 方向传播。设超声波在斜楔内的速度为 v_1 ,在工件内的速度为 v_2 ,则从图 3 可知,入射点 B 处必须满足折射定律,即

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

式中 $\sin\alpha = \frac{FB}{AB}$

$$\sin\beta = \frac{\frac{S}{2} + BG}{BC}$$

探头的折射角可由下式给出

$$\tan\beta = \frac{\frac{S}{2} + BG}{h}$$

延迟时间 t 为

$$t = \frac{AB}{v_1}$$

而 BG 就是探头的前沿距离。只要在程序中输入探头和缺陷的相关尺寸 L, H, S 和 h ,以及斜楔内和工件内超声波的速度,就可采用逼近法求得超声波的入射点 B,从而得出对同一缺陷,不同探头间距所对应的探头折射角、前沿距离及延迟时间,并可绘制出理论上的变化曲线。为了对理论曲线进行验证,笔者进行了一系列试验,分别用三组探头对 1 组试块上不同深度的 $\phi 2$ mm 平底孔进行检测,并与软件计算的理论结果进行对比,两者吻合。图 4 为以 $\phi 6$ mm 60° 探头对深 10 mm、高 10 mm 的 $\phi 2$ mm 平

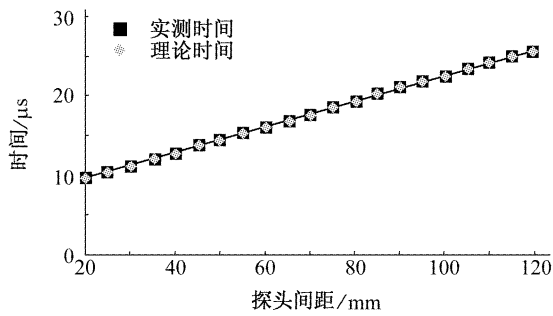


图4 缺陷回波信号实测时间和理论时间对比图

底孔进行检测时超声波传播的实测时间和理论计算时间的对比图,两者最大偏差为 0.04 μs。

仍以 φ6 mm 60° 探头对深 10 mm、高 10 mm 的 φ2 mm 平底孔检测为例,其探头折射角随探头间距的变化曲线见图 5。由图可见,随着探头间距 S 从 20 mm 增加到 120 mm,探头折射角 β 从 59.3° 增加到 81.4°。而前沿距离 BG 从 6.8 mm 缩短到 6.5 mm,延迟时间从 1.62 μs 增加到 1.67 μs。其变化不是很大,在一般检测中可以忽略。用其余几组探头对其它的人工缺陷进行检测,也有相同的变化规律。因此,TOFD 检测过程中探头的实际折射角是变化的,探头的标称折射角只是提供了超声波束的方向和范围。该点有助于更深入地理解 TOFD 检测,并灵活掌握其应用。

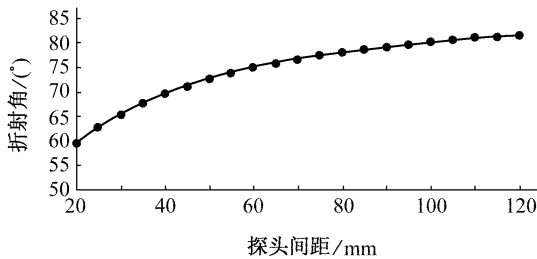


图5 折射角与探头间距的关系

4 TOFD 探头的衍射特性

TOFD 检测中,超声入射波在缺陷端部产生的衍射波会以相同的概率向四周传播,所以,被接收探头接收到的信号就很弱。如果能够知道在什么情况下超声波在缺陷端部的衍射效率最高,那么就可以充分利用探头发射的超声波进行检测。因此,有必要对超声波在缺陷端部产生衍射效率最高时对应探头的折射角进行研究,得出一定的规律,从而指导实际检测。

由于探头发射的超声波能量在晶片中心轴线上最强,离中心轴线越远,能量越低,所以,检测时得到

的最大衍射波就应该是由沿晶片中心轴线传播的超声波束产生的,其对应的折射角就是探头的标称折射角。试验结果也验证了该点。为了消除宽声束的影响,得到衍射效率最高时对应探头折射角的衍射波归一化分布 F 的规律,可以先分别测出每组探头的 1 和 2 号探头对缺陷的反射波高,再分别以 1 和 2 号探头为发射探头测出缺陷的衍射波高,然后对试验结果进行归一化处理,计算公式如下

$$F = \frac{D_1 \cdot D_2}{R_1 \cdot R_2}$$

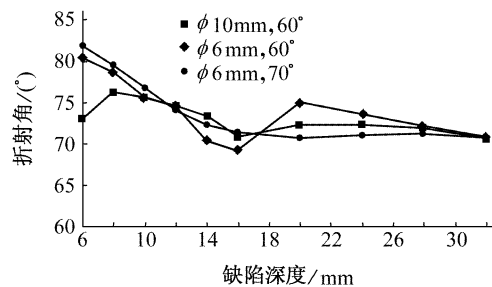
式中 D_1, D_2 ——以 1 和 2 号探头为发射探头测得的缺陷衍射波高

R_1, R_2 ——1 和 2 号发射探头对缺陷的反射波高

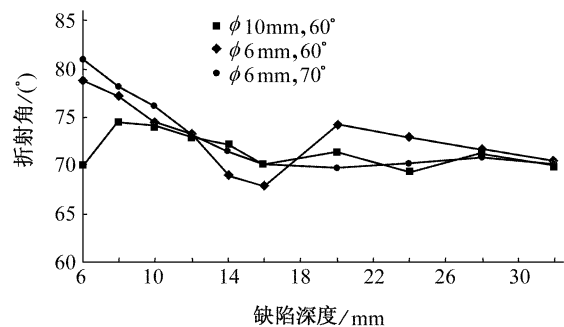
用每组探头对不同深度的每个横通孔进行测试。每次令探头间距 S 在一定范围内变化, S 每增加 2 mm 记录一组数据,求出一个 F 值,然后找出 F 值最大的点,就是该组探头在该缺陷端部产生最大衍射效率的点。然后,就可以用前面设计好的程序计算出对应的探头折射角。因为横通孔有上沿和下沿,会有两个衍射回波,所以可得到两组试验数据。

经过对一系列不同深度的 φ1 mm 横通孔进行测试,得到了超声波在缺陷端部产生衍射效率最大时对应的探头折射角的两条变化曲线(图 6)。

从图 6 可见,当超声波在缺陷端部衍射效率最



(a) 上沿



(b) 下沿

图6 上下沿最大衍射效率时不同探头折射角的变化曲线

中国机械工程学会无损检测分会 无损检测人员 III 级资格考证班通知

GB 9445—2005 标准(等同于 ISO 9712—1999)已由国家质量技术监督局批准,并于 2005 年 3 月 1 日起实施,由于在实施新标准前需做一系列准备工作,所以学会拟在 2006 年下半年实施新标准。在实施新标准前,拟举办最后一期按 GB 9445—1999 标准要求的超声、射线、磁粉和渗透检测人员 III 级资格考证班,日期为 2006 年 6 月 19 日—7 月 2 日(6 月 18 日报到)。

报到地点:上海市邯郸路 99 号 722 室中国机械工程学会无损检测分会秘书处。

报考资格:按标准规定,无损检测专业理工科大学(本科)毕业,具有本专业方法 1 年以上实践经验,并已取得 II 级证书者;理工科大专毕业,具有本专业方法 2 年以上实践经验,并已取得 II 级证书者;其他学历人员,具有 II 级证书 2 年以上,并有 4 年以上实践经验者。

考试内容:笔试“基础知识”“专业方法知识”和

“实践能力”(编制典型工件及构件的无损检测工艺)。

背景材料:报考人员在考前需提供本人从事报考方法的技术总结材料一份以及实践经历证明和健康证明材料各一份。并填写报考申请表一份,每种方法需提供 1 寸证件照片 3 张。

收费:辅导和资料费 1 000 元/每种方法,考试费 600 元/每种方法,合计 1 600 元(每人一次限考两种方法),同时报考两种方法者,费用为 2 800 元;直接参加考试者,只收取考试费。食宿自理(秘书处可推荐住宿场所,100 元/间)。学会可提供工艺考试参考标准一套,即国内无损检测标准(300 元/套)。联系人:朱亚青;地址:上海市邯郸路 99 号 722 室无损检测分会秘书处;邮编:200437;电话/传真:021-65550277;E-mail:chsndt@public2.sta.net.cn;chsndt2008@163.com。

(中国机械工程学会无损检测分会)

大时,不同探头对应的实际折射角有相似的变化规律,且对同一缺陷,不同探头的折射角基本差别不大。当缺陷埋藏较浅时,处于探头的近场区,声场分布比较复杂,虽然对衍射波幅度影响不大,但对反射波幅度影响较大,所以,不同探头的折射角差别较大,但都位于 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。随着缺陷深度增加,各个探头的折射角都趋于 70° ,也就是说,当超声波在缺陷端部衍射效率最大时对应的探头实际折射角与探头标称折射角没有必然的联系,不同的探头有基本相同或者相近的实际折射角。

5 总结

在用 TOFD 方法进行焊缝检测的过程中,首先要根据被测工件的厚度和检测要求,决定选择多大角度的探头,在检测中要注意探头的实际折射角会随着探头间距的增加而变大,而检测过程和结果不应受到其标称折射角的影响。另外,检测时,在保证超声波覆盖范围的前提下,应尽量使探头的实际折射角在 70° 附近,这样可以得到最大的衍射效率,以充分利用超声波能量,并提高缺陷检出率。

参考文献:

- [1] ENV 583—6(2000): Non-destructive Testing—Ultrasonic Examination—Part 6: Time-of-Flight Diffraction Technique as a Method for Defect Detection and Sizing[S].
- [2] 李 衍. 超声 TOFD 法原理和标准介绍[J]. 无损探伤, 2003, 27(3): 1—4.
- [3] 马 崇. 超声波 TOFD 检测技术[J]. 华北电力技术, 2003, (9): 31—33.
- [4] 李 衍. 超声 TOFD 法的基础实验[J]. 无损探伤, 2003, 27(2): 4—10.
- [5] 华云波译. ISO 10375:1997(E): 无损检测——超声检测——探头及其声场的表征[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 215—228.
- [6] 蒋危平, 方 京. 超声检测学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.
- [7] 克劳特克洛默 J, 等著, 李 靖, 等译. 超声检测技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 1984.
- [8] 滕永平, 赵中龄. 多功能超声波界面卡的特性及应用研究[A]. 中国机械工程学会无损检测分会第八届年会/国际无损检测技术交流研讨会[M/CD]. 苏州: 2003.