

浅析衍射时差法超声检测的理论计算与实际应用区别

陈林佐

(湖南省特种设备检验检测研究院岳阳分院 湖南 岳阳 414000)

摘要: 衍射时差法超声检测作为一种无损检测技术,有着复杂的工艺流程,在制作工艺的过程中牵涉到多种测量验证及计算验证。学习衍射时差法超声检测这门技术,在制定具体的施工工艺时接触了很多计算,如扫查面盲区计算、探头扩散角计算等。在实际应用衍射时差法超声检测时,发现计算值与实测值有一定的出入,故本文就衍射时差法超声检测技术的扫查面盲区、探头扩散角在理论计算与实际应用的区别进行浅显分析。

关键词: 衍射时差法超声检测; 扫查面盲区; 扩散角; 实测值; 计算值

0 引言

在特种设备无损检测行业中,衍射时差法超声检测(TOFD)技术是一种比较成熟的无损检测技术,由于具备对缺陷的长度、高度、深度进行精确的测量,尤其对裂纹类缺陷的精准测量,同时还能填补射线检测无法对厚壁工件进行检测的空白,拥有缺陷可记录功能、检测速度快,检测无危害等特点。TOFD检测技术正逐步取代射线、超声等常规无损检测技术应用于厚壁压力容器、压力管道等承压设备埋藏缺陷的检测中。

1 TOFD 检测技术的基本原理

衍射现象是指波在传播过程中,遇到障碍物,能够绕过障碍物,产生偏离直线传播的现象。缺陷端点衍射现象可以用惠更斯-菲涅尔原理解释:惠更斯提出,介质上波阵面上的各点,都可以看成是发射子波的波源,其后任意时刻这些子波的包迹,就是该时刻的新波阵面。菲涅尔充实了惠更斯原理,他提出波前上每个面元都可视为子波的波源,在空间某点的振动是所有这些子波在该点产生的相干振动的叠加。当一束超声波入射到缺陷时,在缺陷中部会形成有一定方向的发射波,其方向满足发射定律。

发射波接近平面波,其波阵面是由众多子波源发射波叠加构成。在缺陷尖端则没有叠加现场发生。这种缺陷尖端以独立的子波源发射的超声波即为衍射波。衍射波的重要特点是没有明显的方向性和衍射波强度很弱。衍射时差法超声检测技术是采用一发一收双探头实施检测,发射探头发射的超声波通过不同路径被接收探头接收到后会形成直通波、底面发射波,当被检工件中有缺陷时,还会形成缺陷上下端点的衍射信号。通过测量缺陷上下端点的衍射信号到达时间和时间差,就可以确定

缺陷上下端点的位置及缺陷自身高度。

2 扫查面盲区

TOFD检测技术对缺陷的定量不是基于信号的波幅,而是基于缺陷尖端衍射信号的声程和时间。直通波和底面反射波作为重要的参考信号有助于对缺陷信号的识别判断。对上表面缺陷,因为缺陷信号可能隐藏在直通波信号下而漏检,扫查面盲区范围比底面盲区更大,对检测可靠性的影响也更大。扫查面附近的内部缺陷的信号可能隐藏在直通波信号之下,导致无法识别,因此扫查面盲区就是直通波信号所覆盖的深度范围。

2.1 TOFD 扫查面盲区计算与实测

图1为直通波的传输时间。如果声速为 V ,探头中心距为 PCS ,直通波的传输时间是 $t_r = \frac{PCS}{V}$,直通波脉冲时间宽度为,则盲区的深度根据图1,可按式算出:

$$D_z = \sqrt{\left(\frac{(T_L + T_P) \times V}{2}\right)^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} \quad (1)$$

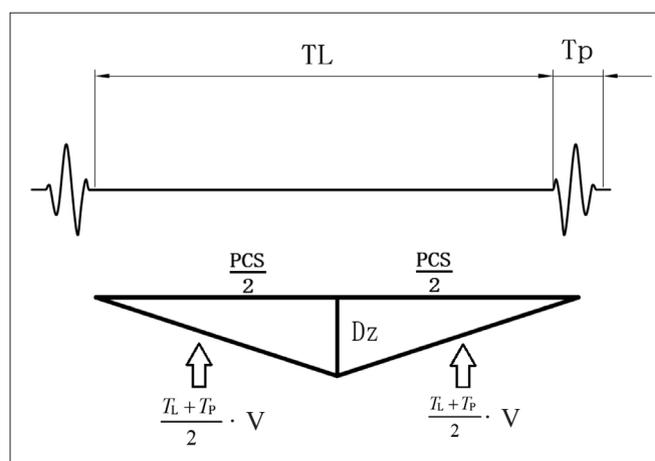


图1 直通波的传输时间

$$\begin{aligned} \text{将 } t_i = \frac{PCS}{V} \text{ 代入 } D_z &= \sqrt{\left(\frac{\frac{PCS}{V} + T_p}{2} \times V\right)^2 - \left(\frac{PCS}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{V \times T_p}{2}\right)^2 + V \times \frac{PCS}{2} \times T_p} \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,盲区的大小与3个量有关:V、 T_p 和PCS,其中V为材料中纵波的声速,为一定值; T_p 是直通波脉冲时间宽度,与频率和探头带宽有关;PCS是探头中心间距,取值与工件尺寸有关。

采用5MHz ϕ 6mm 63° 探头对40mm工件进行TOFD扫查,直通波周期为1.5,则表面盲区高度为:

$$PCS = 2 \times 2/3 \times K \times t = 4/3 \times \tan 63^\circ \times 40\text{mm} = 104.7\text{mm}$$

$$T_p = 1.5/f = 1.5 / (5 \times 10^5) = 0.3 \times 10^{-5}$$

将 $V = 5.9 \times 10^6$ mm/s 纵波声速, $T_p = 0.3 \times 10^{-6}$ 代入式(1)中得:

$$D_z = \sqrt{\left(\frac{5.9 \times 0.3}{2}\right)^2 + 5.9 \times \frac{104.7}{2} \times 0.3} = 9.67 \text{ (mm)}$$

则在上述条件下,计算盲区深度为9.67mm。

2.2 TOFD 扫查面盲区实测

在同等条件下,在TOFD扫查面盲区高度测定试块上进行扫查,经过多次扫查,在试块5mm和9mm侧孔侧检测出5mm侧孔。故确认5MHz ϕ 6mm 63° 探头对40mm工件进行TOFD检测,在直通波周期为1.5的情况下,扫查面盲区实测值为5mm。其结果如图2所示。

2.3 扫查面盲区计算值与实测值分析

通过比较,发现计算值与实测值相差比较大,几乎接近一倍,究其原因,主要是由于TOFD技术使用宽频带宽波束探头,信号频率是变量,处于声束边缘的直通

波的频率低于探头标称频率,声波传输过程中又有频散现象,回波频率低于发射频率而导致,因此直通波的周期时间按探头标称频率取值计算是不准的。采用短脉冲探头也是十分重要的,如果使用的探头频带较窄,脉冲长度较大,则 T_p 取值就应更大,计算的盲区也更大。

用式(2)计算扫查面盲区虽然简便易行,但不够准确。用计算机仿真软件来计算直通波盲区,结果要准确一些,但软件价格较贵。最可靠和实用的方法是通过对比试块来测定盲区大小。

3 探头扩散角

利用压电晶片产生的超声波都是以垂直压电晶片表面正中心为中心的一个锥形声波束,靠近中心的声波能量大,远离中心的声波能量小。当声波能量小到一定值时,一般认为这个角度的声波无法对缺陷等信号进行有效分辨,只有在这个值对应的角度范围内的声波才是有效声波。有效声波与正中心所成最大角度为探头的扩散角。

3.1 探头扩散角计算

声波从一种介质进入以另一种不同介质会发生折射现象,故探头与楔块组合后,压电晶片产生声波束以楔块角度经过楔块与被检物件界面发生折射,声束角一般会进一步扩大,声波在被检物件中的角度为TOFD检测需要计算的扩散角。

以3.5MHz ϕ 9.6mm的探头,楔块角度为 55° ,被检物件超声波声速为5900m/s为例(楔块一般材料为有机玻璃/聚苯乙烯,楔块中超声波声速一般取2400m/s,扩散角扩散因子取0.7):

楔块中纵波入射角:

$$\sin p_{\theta_2} = \sin 55^\circ \times 2.4/5.9 = 0.351$$

$$\theta_{p_2} = 20.55^\circ \theta$$

楔块中声束扩散角:

$$\sin p_{y_2} = 0.7 \times 2.4/5.9 \quad (3.5 \times 9.6) = 0.5$$

$$y_{p_2} = 2.84^\circ$$

楔块中纵波声束的上下边界角:

$$y_{p_{上2}} = 20.55 + 2.87 = 23.42^\circ$$

$$y_{p_{下2}} = 20.55 - 2.87 = 17.68^\circ$$

计算钢中纵波的声束上下边界角:

$$\sin p_{y_{上2}} = \sin 23.42 \times 5.9/2.4$$

$$= 0.977$$

$$y_{i_{上2}} = 77.69^\circ$$

$$\sin p_{y_{下2}} = \sin 17.68 \times 5.9/2.4$$

$$= 0.747$$

$$y_{i_{下2}} = 48.33^\circ$$

故计算出的扩散角为 $48.33^\circ \sim 77.69^\circ$ 。

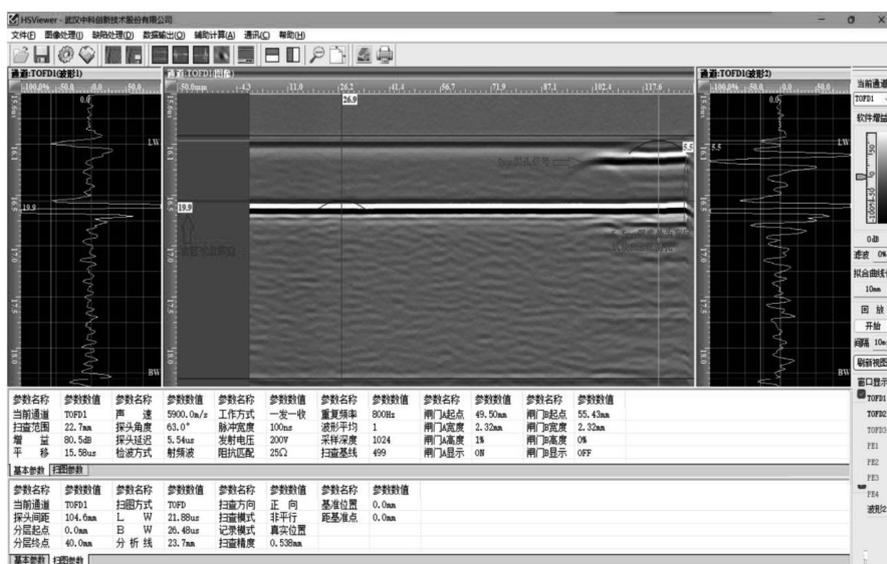


图2 TOFD扫查面盲区高度测定实测结果

3.2 探头扩散角实测

将 3.5MHz ϕ 9.6mm 的探头和 55° 的楔块进行组合后在声束扩散角测定试块 (图 3) 上进行测试, 测试步骤为:

(1) 将被测试探头和楔块组合, 将组合好的探头主声束入射点对准试块的刻度线, 也可以在 A 超模式移动探头找到最高反射波的方法将探头主声束入射点与试块的刻度线对齐;

(2) 用另一个不带楔块的探头在刻度侧来回移动找到最高波, 并通过自动增益将波幅增益到满屏的 80%, 此时探头所在位置刻度为被测探头组合的主声束角度, 一般跟楔块角度一致;

(3) 上下移动探头, 当波幅降到满屏的 20% 时, 此时探头位置为对应的角度为被测探头组合的 -12dB 扩散角。

通过测量, 得到 3.5MHz ϕ 9.6mm 的探头和 55° 的楔块的扩散角为 37° ~ 77°, 与计算值有一定出入。

3.3 探头扩散角计算值与实测值比较分析

通过实测值与计算值比较, 发现计算的下扩散角与实测的下扩散角相差 10°。究其原因, 主要有以下几点导致计算与实测不一致:

(1) 探头尺寸、频率和楔块角度的实际值与标称值有差异, 导致计算有误差;

(2) 楔块材质的超声波声速与计算时所用值有误差;

(3) 扩散角扩散因子应是一个测算值, 在计算过程中常采用 0.7 等这种经验值来代替。

由于以上原因, 发现不能将计算得来的扩散角数值直接应用于具体检测工作中, 可将计算值仅用于参考, 可用于探头的初步选择, 或者是对初学者对 TOFD 原理的一个加深理解。在 TOFD 检测实际中应采用实测来确定探头扩散角。

4 结语

TOFD 检测中, 探头扩散角和扫查面盲区对检测的影响是非常大的, 它影响到探头的选择、工艺的选择等, 所以得到精准的探头扩散角和扫查面盲区深度至关重要。如果将探头扩散角和扫查面盲区深度的计算值直接应用于检测过程中, 会造成对缺陷的漏检、检测工作任务增加和检测工艺选择错误等后果。因此, 在 TOFD 检测中应采用实测的方法来得到探头扩散角和扫查面盲区深度。可以通过对探头扩散角和扫查面盲区深度计算得出的量值关系后改进工艺, 使盲区减小, 并提高检测精度, 比如, 采用减小 PCS、增加数字化频率、使用更高频率的探头, 以及使用短脉冲宽频带的探头等。从上面论述中, 可以总结一个经验, 任何无损检测技术, 不仅要对其的原理等理论知识要掌握, 也需要经历现场实践, 只有理论与实践相结合才能更好地掌握这门技术。

参考文献:

- [1] NB/T 47013-2015, 承压设备无损检测 [S].
- [2] 刘宏宇. 浅谈 TOFD 技术在承压设备无损检测中的应用前景 [J]. 中国高新技术企业, 2009(17): 55-56.
- [3] 林乃昌. 基于变型波的超声 TOFD 近表面检测新方法 [J]. 机电工程, 2013(8): 967-970.

作者简介: 陈林佐 (1987-), 男, 汉族, 湖南岳阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 特种设备 (压力容器、压力管道) 检验检测。

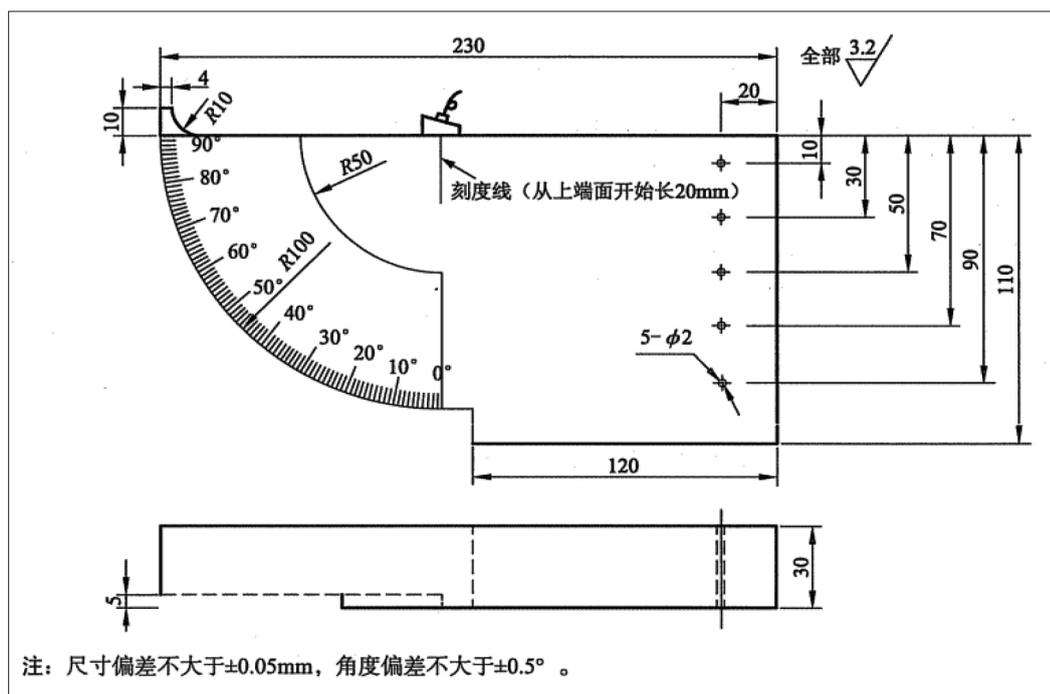


图3 声束扩散角测定试块