

T 型接头 TOFD 检测时缺陷深度的定位计算与评判

杨育伟, 梁楠, 朱稳

(西安特种设备检验检测院, 西安 710065)

摘要: 讨论了在 T 型接头 TOFD 检测时如何建立模拟等腰三角形, 以适应仪器内置的深度定位计算程序。介绍了显示深度与实际深度的修正计算方法, 并通过计算显示深度测量值与计算值的误差, 验证了上述计算方法的准确性。最后, 通过对 T 型接头试块检测结果的分析, 探讨了 T 型接头翼板未熔合、腹板未熔合及角焊缝内缺陷的评判规律。

关键词: T 型接头; TOFD 检测; 深度定位计算; 模拟等腰三角形; 显示深度; 实际深度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)03-0040-06

Calculation and evaluation of defect depth location in T-joint TOFD detection

YANG Yuwei, LIANG Nan, ZHU Wen

(Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper firstly discussed how to establish simulated isosceles triangle in TOFD testing of T-joint to adapt to the default calculation program of depth location. Then, we introduced the modified calculation method between the measured depth and the actual depth, and verified the correctness of the above calculation method by calculating the error between the measured depth and the calculated value. Lastly, the rules of evaluating the defects, such as incomplete fusion in flange slab and web as well as defects in fillet weld on the T-joint were discussed through the analysis of the test results of T-joint.

Key words: T-joint; TOFD detection; depth location calculation; simulated isosceles triangle; measured depth; actual depth

标准 NB/T 47013.10—2015 适用于等厚平板对接接头的 TOFD 检测, 而不适用于 T 型接头的 TOFD 检测。等厚平板对接接头 TOFD 检测时探头间距等于直通波声程, 深度定位计算的实质是计算以直通波声程为底边与以衍射波半声程为斜边的等腰三角形底边的高。但 T 型接头除翼板下表面中心点之外, 其他焊缝位置的衍射波路径与直通波路径所形成的都是非等腰三角形, 与等厚平板对接接头的计算不同, 故需对该种型式接头 TOFD 检测时的深度计算方法进行研究, 以满足实际检测工作需要。

黄辉等^[1]采用 CIVA 软件对不等厚平板对接接头的 TOFD 检测进行仿真模拟, 分析了不等厚平板对接接头表面盲区的大小和埋藏缺陷的模拟检测能力, 却未讨论 T 型接头的 TOFD 检测能力和解决埋藏缺陷深度定位计算的问题。齐向前等^[2]介绍了对翼板不受结构条件限制的 T 型接头进行 TOFD 检测时, 探头中心距(P_{CS})设置及探头参数的选择, 针对声束对 T 型接头覆盖问题制定了相应检测工艺, 但未讨论解决 T 型接头 TOFD 检测的显示深度与实际深度的差异。笔者讨论了 T 型接头 TOFD 检测时探头布置及埋藏缺陷的显示深度与实际深度的差异问题, 解决了其埋藏缺陷定位的问题。

1 T 型接头结构及缺陷分析

在承压设备中, T 型接头多用于平封头与受压

收稿日期: 2020-08-13

作者简介: 杨育伟(1961—), 男, 本科, 正高级工程师, 从事特种设备检验、无损检测工作

通信作者: 杨育伟, 2287304472@qq.com

元件的连接,根据标准 GB 150.3—2011,其常用结构如图 1 所示。

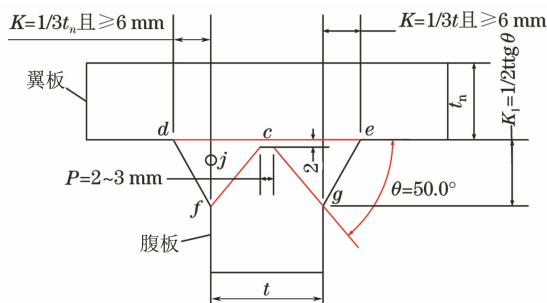


图 1 T 型接头结构示意图

由图 1 可知,T 型接头可能存在的焊接缺陷包括翼板下表面 dce 处的未熔合(简称翼板未熔合)和腹板坡口 fc,gc 处的未熔合(简称腹板未熔合)以及接头角焊缝(简称角焊缝)中的内部缺陷(如缺陷 j)。对 T 型接头而言,翼板未熔合和腹板未熔合是危害性最大的缺陷,检测时应重点关注。所以 T 型接头翼板未熔合和腹板未熔合缺陷埋藏深度的检测和定位是 TOFD 检测应解决的主要问题。

2 T 型接头 TOFD 检测深度定位计算

T 型接头 TOFD 检测非平行扫查探头布置如图 2 所示,其布置方式为发射探头与接收探头均置于翼板上表面,分别位于角焊缝外边缘延长线与翼板上表面的交点 a, b 处,并对称于接头中心线(简称中心线)。即探头某一角度为 α_1 的声束与角焊缝外边缘线 df, ge 相切,以确保声束对角焊缝的全覆盖。两探头某一角度为 α_1 的声束交点位于接头中心线上 O 点。图中探头 a 为发射探头,探头 b 为接收探头,直通波沿翼板上表面路径 ab 传播。

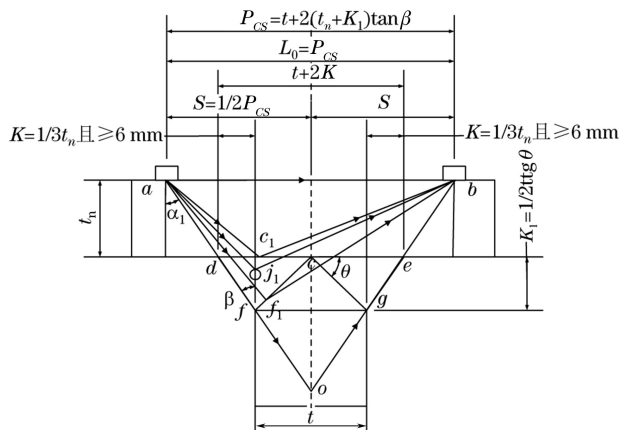


图 2 T 型接头 TOFD 检测非平行扫查探头布置示意

直通波的传播路径与经翼板未熔合 c_1 点、腹板未熔合 f_1 点及角焊缝内部缺陷 j_1 点衍射波的传播

路径所形成的非等腰三角形分别为 ac_1b, af_1b 和 aj_1b 。显然,上述 3 个三角形均与仪器按探头中心距(P_{CS})所默认的等腰三角形不同,故仪器预置的深度定位计算程序无法适用于 T 型接头。因此,须对探头布置、图谱测量的显示深度与实际深度的修正计算等问题做相应的处理。

经翼板未熔合 c_1 点、腹板未熔合 f_1 点及角焊缝内部缺陷 j_1 点衍射波的传播路径不同,因此对这署种情况需分别讨论。

2.1 翼板未熔合

2.1.1 探头布置、探头间距以及直通波声程

如图 2 所示,T 型接头翼板母材厚度为 t_n ,腹板母材厚度为 t 。 P_{CS} 设置如上节所述,经修正计算,

$$P_{CS} = t + 2(t_n + K_1) \tan \beta \quad (1)$$

式中: K_1 为腹板焊脚尺寸; β 为线段 df 与法线方向的夹角。

2.1.2 模拟衍射点、模拟路径声程、模拟等腰三角形及模拟深度的计算

翼板未熔合模拟深度计算原理如图 3 所示,翼板下表面 c_1 点距中心线的距离为 x ,经 c_1 点的衍射波路径为 ac_1b ,其声程 $L = L_1 + L_2 = [t_n^2 + (S - x)^2]^{1/2} + [t_n^2 + (S + x)^2]^{1/2}$ 。在中心线上可确定一点 c' ,使路径 $ac'b$ 与路径 ac_1b 的声程相等。 c' 点称为模拟衍射点,经模拟衍射点的路径 $ac'b$ 称之为模拟路径,其声程 $L' = L'_1 + L'_2 = 2(h'^2 + S^2)^{1/2}$ 称之为模拟路径声程。模拟路径声程等于实际路径声程,即 $L = L'$ 。模拟衍射点 c' 与翼板上表面之间的距离 h' 称之为模拟深度。以直通波声程 L_0 为底边,模拟路径 $ac'b$ 半声程为斜边的等腰三角形 $ac'b$ 称之为模拟等腰三角形,模拟深度 h' 即模拟等腰三角形底边的高。

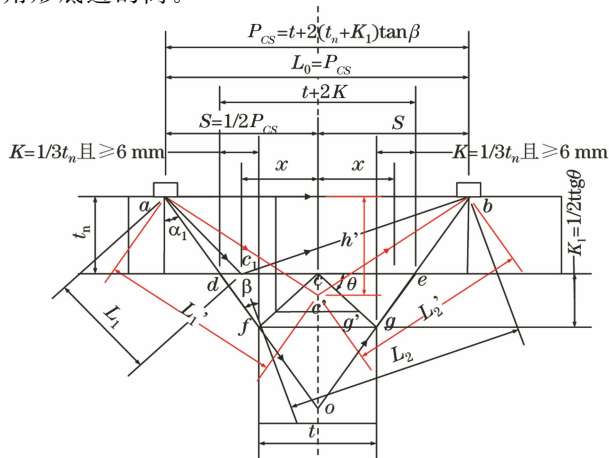


图 3 翼板未熔合深度计算原理示意

2.1.3 显示深度及实际深度的修正计算

如图 3 所示, 模拟等腰三角形 $ac'b$ 与实际等腰三角形 ac_1b 底边相同, 均为探头中心距, 且等于直通波声程, 即 $P_{CS} = L_0$, 则直通波传播时间 $\tau_0 = L_0/V_L$ (V_L 为声速)。模拟路径声程等于实际路径声程, 则模拟路径传播时间等于实际路径传播时间, 即 $\tau' = \tau$ 。所以, 模拟路径与直通波的时间差等于实际路径与直通波时间差, 即 $\Delta\tau' = \Delta\tau$ 。

仪器设置时输入探头间距 $P_{CS} = L_0$, 当测得经 c_1 点的衍射波与直通波的时间差 $\Delta\tau$ 时, 可计算 c_1 点的显示深度 $h_{c1\text{显}} = \frac{1}{2}[\Delta\tau V_L (2L_0 + \Delta\tau V_L)]^{1/2}$ 。同样, 当测得经 c' 点的模拟衍射波与直通波的时间差 $\Delta\tau'$ 时, 可计算 c' 点的模拟深度 $h' = \frac{1}{2}[\Delta\tau' V_L (2L_0 + \Delta\tau' V_L)]^{1/2}$ 。由前述可知, $\Delta\tau' = \Delta\tau$, 则 $h_{c1\text{显}} = h'$, 所以把模拟等腰三角形作为默认等腰三角形, 并计算其底边高度所得到的模拟深度 h' 即 c_1 点的显示深度 $h_{c1\text{显}}$ (以下均称显示深度 h')。

由前述知, 模拟路径声程等于实际路径声程, 则可得

$$[t_n^2 + (S - x)^2]^{1/2} + [t_n^2 + (S + x)^2]^{1/2} = 2(h'^2 + S^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$h' = \left\{ \frac{1}{4} \{ [t_n^2 + (S - x)^2]^{1/2} + [t_n^2 + (S + x)^2]^{1/2} \}^2 - S^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中: S 为 $1/2$ 探头中心距; x 为缺陷距中心线实际距离。

翼板未熔合的实际深度均为翼板母材厚度, 但距中心线不同位置处的翼板未熔合的显示深度不同, 所以对 T 型接头进行检测时, 输入 P_{CS} , 检测后在图谱上测量出某点的显示深度 h' , 按式(2)即可计算出该点距中心线的实际位置 x 。或已知某点距中心线的实际距离, 按式(3)即可计算出该点的显示深度 h' 并同时给出显示深度 h' 的计算值与测量值。

2.2 腹板未熔合

以相同方式布置探头, $P_{CS} = t + 2(t_n + K_1)\tan\beta$, 直通波声程 $L_0 = P_{CS}$ 。以类似方式设定模拟等腰三角形, 模拟路径声程等于实际路径声程。

腹板未熔合深度计算原理如图 4 所示, 腹板坡口 f_1 点距 T 型接头翼板下表面的距离为 y , 经 f_1 点的衍射波路径为 af_1b , 其声程

$$L = L_1 + L_2 = \left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

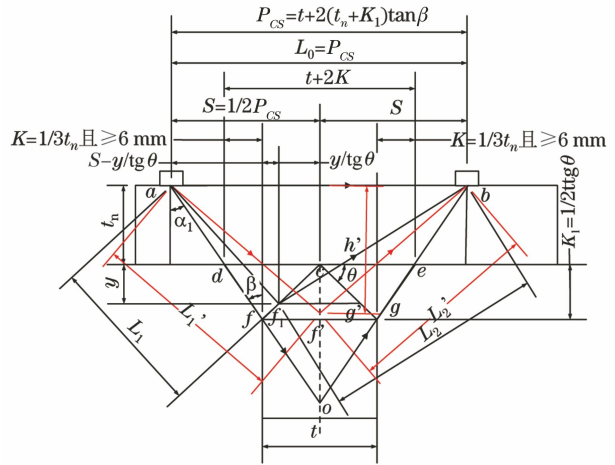


图 4 腹板未熔合深度计算原理示意

按前述原则建立模拟等腰三角形 $af'b$, 则模拟路径声程 $L' = L'_1 + L'_2 = 2(h'^2 + S^2)^{1/2}$, 可得

$$\left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} = 2(h'^2 + S^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$h' = \left\{ \frac{1}{4} \left\{ \left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{y}{\tan\theta} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^2 - S^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

2.3 角焊缝内缺陷

探头布置同前, $P_{CS} = t + 2(t_n + K_1)\tan\beta$, 直通波声程 $L_0 = P_{CS}$ 。

如图 5 所示, 角焊缝内缺陷 j_1 点距 T 型接头翼板下表面的距离为 y , 设距中心线的距离为 $t/2$ 。经 j_1 点的衍射波路径为 aj_1b , 其声程

$$L = L_1 + L_2 = \left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

按前述原则建立模拟等腰三角形 $aj'b$, 则模拟路径声程 $L' = L'_1 + L'_2 = 2(h'^2 + S^2)^{1/2}$, 可得

$$\left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 2(h'^2 + S^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$h' = \left\{ \frac{1}{4} \left\{ \left[(t_n + y)^2 + \left(S - \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[(t_n + y)^2 + \left(S + \frac{t}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^2 - S^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

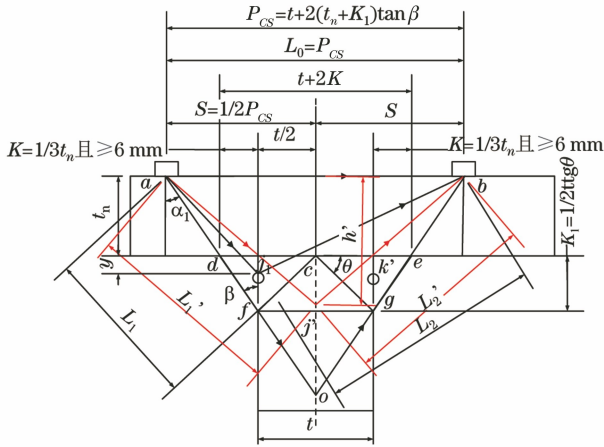
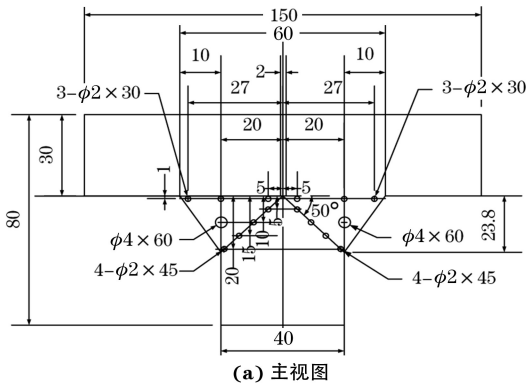
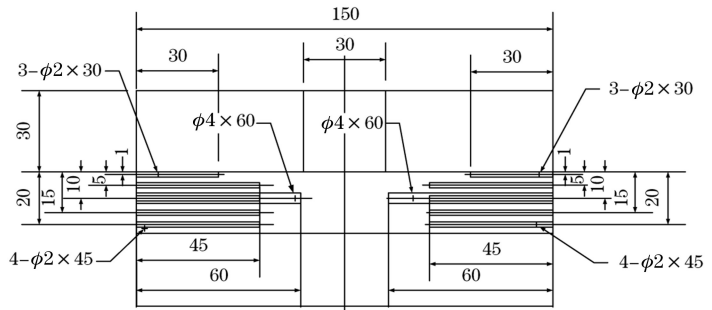


图 5 角焊缝内缺陷深度计算原理示意



(a) 主视图



(b) 左视图

图 6 T 型接头试块结构示意图

探头布置方式与图 2 相同, $P_{CS} = 85$ mm, 仪器中输入 $P_{CS} = 85$ mm, 上述各人工缺陷检测结果如表 1~4 所示。

3.1 翼板下表面中心槽的显示深度计算值与测量值

如图 6 所示, 翼板下表面宽 2 mm 中心槽的实际深度为 30 mm, 如图 7 所示, 其超声波传播路径为 ac_2c_3b , 显示深度计算值为 30.3 mm; 其显示深度计算值与测量值如表 1 所示。

表 1 翼板下表面中心槽及 $\phi 2$ mm 孔上端点实际深度、显示深度计算值与测量值 mm

$\phi 2$ 孔距中心线距离	实际深度	显示深度计算值	显示深度测量值	误差/%
0 中心槽	30.0	30.3	30.9	1.9
左 5	30.0	30.1	30.7	1.8
右 5	30.0	30.1	29.8	-1.1
左 20	30.0	32.3	32.9	1.7
右 20	30.0	32.3	32.6	0.8
左 27	30.0	33.2	33.7	1.5
右 27	30.0	33.2	33.1	-0.2

上述缺陷深度计算时, 角焊缝中缺陷 j_1 的水平位置设定为距接头中心线左侧 $t/2$ 处, 当然缺陷也会在角焊缝内水平方向其他位置处出现, 所以发现缺陷后还需采用超声直探头或斜探头进行准确定位。

3 实验验证

为验证上述计算的正确性, 设置内含不同位置不同尺寸缺陷的 T 型接头试块, 该试块上翼板下表面中心槽、翼板下表面左右侧不同位置 $\phi 2$ mm 孔、腹板左右侧坡口不同位置 $\phi 2$ mm 孔和角焊缝内 $\phi 4$ mm 孔人工缺陷进行 TOFD 检测, 将显示深度的测量值与计算值进行比较, 并计算其误差。

仪器型号为 INSONIC 2005; 探头频率为 5 MHz; 晶片尺寸为 $\phi 3$ mm; 探头角度为 45° 。

T 型接头试块结构如图 6 所示。

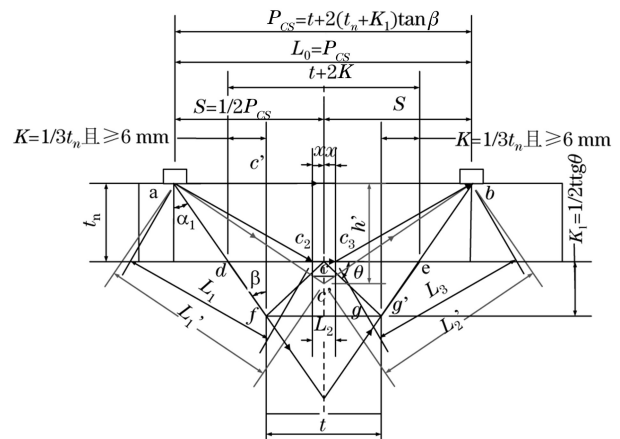


图 7 T 型接头中心槽超声波传播路径示意

3.2 翼板下表面左右侧 $\phi 2$ mm 孔上端点的显示深度计算值与测量值

如图 6 所示, 翼板下表面左右侧 $\phi 2$ mm 孔距中心线的距离分别为 5, 20, 27 mm, 翼板下表面宽 2 mm 中心槽及左右侧 $\phi 2$ mm 孔上端点的显示深

度计算值与测量值如表 1 所示。

3.3 腹板左、右侧坡口 $\phi 2\text{ mm}$ 孔上、下端点的显示深度计算值与测量值

腹板左、右侧坡口 $\phi 2\text{ mm}$ 孔位置如图 6 所示,其上端点和下端点的显示深度计算值与测量值分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 腹板左侧坡口 $\phi 2\text{ mm}$ 孔上下端点实际深度、显示深度计算值与测量值 mm

$\phi 2$ 孔距翼板下表面位置	实际深度	显示深度计算值	显示深度测量值	误差/%
5 上端点	34.0	35.1	35.5	1.1
5 下端点	36.0	37.2	37.7	1.3
10 上端点	39.0	40.4	39.6	-2.1
10 下端点	41.0	42.6	41.8	-1.9
15 上端点	44.0	45.9	46.2	0.6
15 下端点	46.0	48.2	48.7	1.0
20 上端点	49.0	51.7	50.8	-1.7
20 下端点	51.0	54.0	53.8	-0.3

表 3 腹板右侧坡口 $\phi 2\text{ mm}$ 孔上下端点实际深度、显示深度计算值与测量值 mm

$\phi 2$ 孔距翼板下表面位置	实际深度	显示深度计算值	显示深度测量值	误差/%
5 上端点	34.0	35.1	35.4	0.8
5 下端点	36.0	37.2	37.6	1.1
10 上端点	39.0	40.4	39.7	-1.8
10 下端点	41.0	42.6	42.6	0.0
15 上端点	44.0	45.9	45.7	-0.5
15 下端点	46.0	48.2	48.3	0.2
20 上端点	49.0	51.7	52.1	0.9
20 下端点	51.0	54.0	54.3	0.6

3.4 角焊缝中左右侧 $\phi 4\text{ mm}$ 孔上、下端点的显示深度计算值与测量值

如图 6 所示,角焊缝中左右侧 $\phi 4\text{ mm}$ 孔距中心线的距离为 20 mm ,距翼板下表面的距离为

表 5 翼板下表面距中心线 $0\sim 30\text{ mm}$ 处未熔合显示深度计算值 mm

项目	距中心线距离									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
显示深度计算值	30	30	30	30	30.1	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5
距中心线距离	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
显示深度计算值	30.6	30.7	30.8	31.0	31.1	31.3	31.5	31.7	31.9	32.1
距中心线距离	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
显示深度计算值	32.6	32.9	33.2	32.5	32.7	32.9	33.2	33.4	33.7	34.0

从表 5 可知,距中心线 $0\sim 30\text{ mm}$ 范围内翼板未熔合的显示深度范围为 $30\sim 34\text{ mm}$ 。实际检测时,对显示深度在该范围内的缺陷可初步判断为翼

板下表面未熔合,并可根据显示深度对应的距中心线的距离来确定该缺陷的水平位置,然后通过 TOFD 检测平行扫查或使用超声波直探头或斜探

表 4 角焊缝中左、右侧 $\phi 4\text{ mm}$ 孔上下端点实际深度、显示深度计算值与测量值 mm

$\phi 4$ 孔距翼板下表面位置	实际深度	显示深度计算值	显示深度测量值	误差/%
左 10 上端点	38.0	39.4	39.7	0.7
左 10 下端点	42.0	45.4	46.1	1.5
右 10 上端点	38.0	39.4	39.9	1.2
右 10 下端点	42.0	45.4	46.0	1.3

3.5 显示深度计算值与测量值误差

从表 1~4 可以看出,翼板下表面宽 2 mm 中心槽及左右侧 $\phi 2\text{ mm}$ 孔上端点,腹板左右侧坡口 $\phi 2\text{ mm}$ 孔上、下端点,角焊缝中左右侧 $\phi 4\text{ mm}$ 孔上、下端点的显示深度测量值与计算值最大偏差分别为 1.9% 、 -2.1% 、 -1.8% 、 1.5% 。考虑到探头间距偏差、扫查轨迹偏差等因素,可以认为上述验证结果是准确的,按前述公式的计算结果是正确的。

4 T型接头试块 TOFD 检测结果分析及缺陷评判

某 T 型接头翼板厚度为 30 mm ,腹板厚度为 40 mm ,腹板坡口角度 β 为 50° ,翼板处角焊缝单侧宽度 K 为 10 mm ,腹板处角焊缝高度 K_1 为 23.8 mm (见图 1),则翼板未熔合区域单侧宽度为中心线左右各 $0\sim 30\text{ mm}$,腹板未熔合区域高度为翼板下 $0\sim 23.8\text{ mm}$ 。因 T 型接头左右对称,以下仅讨论单侧(左侧)的情况。

4.1 翼板未熔合

翼板未熔合的实际深度为 30 mm ,按式(3)可计算出距中心线每间隔 1 mm 处翼板未熔合的显示深度(见表 5)。

板下表面未熔合,并可根据显示深度对应的距中心线的距离来确定该缺陷的水平位置,然后通过 TOFD 检测平行扫查或使用超声波直探头或斜探

头扫查即可确定缺陷的准确位置。

4.2 腹板未熔合

腹板未熔合区域为翼板下表面 0~23.8 mm

处,距翼板上表面实际深度为 30~53.8 mm(翼板厚度 30 mm)。按式(6)可计算出距翼板下表面每隔 1 mm 处显示深度(见表 6)。

表 6 腹板坡口距翼板下表面 0~23.8 mm 处未熔合显示深度计算值

mm

项目	距翼板下表面距离											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
实际深度	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
显示深度计算值	31	32	33	34.1	35.1	36.1	37.2	38.3	39.3	40.4	41.5	42.6
距翼板下表面距离	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23.8
实际深度	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	53.8
显示深度计算值	43.7	44.8	45.9	47.1	48.2	49.3	50.5	51.7	52.8	54.0	55.2	56.1

从表 6 可知,距翼板下表面 0~4 mm 范围内腹板未熔合的显示深度为 30~34.1 mm,与翼板未熔合的显示深度 30~34 mm 重合,所以对显示深度为 30~34.1 mm 的缺陷,应采用超声直探头或斜探头进行扫查以确认其为翼板未熔合或腹板未熔合。距翼板下表面 5~23.8 mm 范围内腹板未熔合的显示深度为 35.1~56.1 mm,与翼板未熔合的显示深度 30~34 mm 互不干扰,则可初步判断该缺陷为腹板未熔合,然后通过 TOFD 检测平行扫查或超声波直探头或斜探头检测即可确定缺陷的准确位置。

4.3 角焊缝中的缺陷

角焊缝中缺陷声程及其最大、最小声程如图 8 所示,角焊缝中的气孔、夹渣类缺陷在 $d f c$ 区域内任何位置均可能出现,任一位置缺陷的声程如 $a j_1 b$ 均在最小声程 $a c b$ 和最大声程 $a f b$ 之间,则其显示深度也在翼板未熔合显示深度和腹板未熔合显示深

度 30~56.1 mm 之间,因此会干扰缺陷性质和位置的判断。但翼板未熔合和腹板未熔合任一位置的显示深度均为某一特定值,所以,对应该特定值即可初步判断该缺陷是否为角焊缝中的缺陷,然后通过 TOFD 检测平行扫查或超声波直探头或斜探头检测即可确定缺陷的准确位置,进而确定其是否为翼板未熔合或腹板未熔合。

5 结语

通过分析可知,以直通波声程为底边,衍射波半声程为斜边的模拟等腰三角形计算法对 T 型接头的 TOFD 检测是适用的。

对 T 型接头进行 TOFD 检测时,可采用两探头布置在翼板上表面的方式对 T 型接头进行 TOFD 检测,沿中心线做一次非平行扫查,然后对有缺陷的区域进行平行扫查或采用超声直探头或斜探头对缺陷准确定位即可,检测效率极高。除承压设备中的 T 型接头外,公路、铁路箱型桥和其他工业建筑钢结构中也使用了大量的 T 型接头,采用 TOFD 对这些 T 型接头进行检测将会产生较大的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 黄辉,薛东剑,邹纳. 厚壁不对称对接焊缝超声衍射时差法检测中的仿真模拟[J]. 无损检测, 2016, 38(5): 10-13.
- [2] 齐向前. T 型焊接接头的超声波 TOFD 检测方法[J]. 无损检测, 2014, 36(9): 75-77.

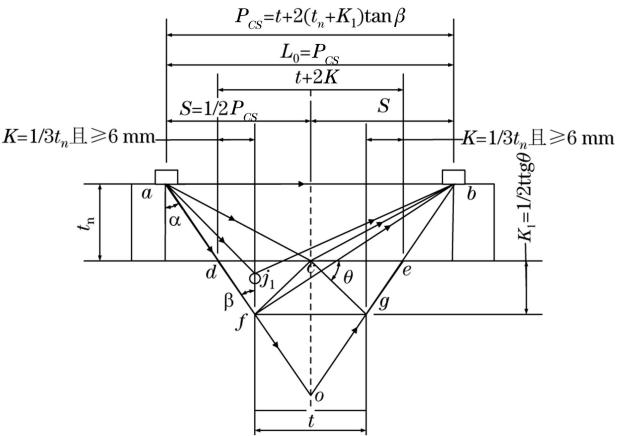


图 8 角焊缝中缺陷声程及其最大、最小声程示意