

# 薄板奥氏体不锈钢对接焊缝 超声波探伤方法

郑文江 郭少宏 邓 波 曹福想

(广东省特种设备检测院佛山分院 广东 528000)

薄板奥氏体不锈钢(这里指厚度  $3 \leq \delta < 10\text{mm}$  的板材)在压力容器中应用十分广泛。在压力容器检验中,奥氏体不锈钢容器常用检验方法中除了宏观检验外,着色探伤是最主要的无损检测手段。但着色探伤只能检查表面缺陷,对在用奥氏体不锈钢压力容器来说,很多缺陷都是内部缺陷,因此应用超声波探伤,对压力容器检验有着重要的实用价值。

## 1 探伤方法的选择

在 JB/T 4730.3—2005 超声检测标准中,对奥氏体不锈钢焊缝采用纵波斜探头,一次波法探伤,且规定该方法仅适用母材厚度  $\delta \geq 10\text{mm}$ 。显然,当厚度  $\delta < 10\text{mm}$  时,用一次波法存在检测盲区,无法满足探伤要求,必须要用二次波和三次波进行探伤。但采用纵波斜入射探伤时,一次波就有纵波和横波两种波在工件中传播产生波型转换,经底面反射后出现 4 种波在工件中传播,给缺陷的定位和判别带来极大的困难。而采用横波进行二次波和三次波探伤具有以下优势:

1) 当板厚  $\geq 10\text{mm}$  时由于探伤声程较长,超声波在奥氏体钢中的衰减较大,而纵波比横波衰减较少,因此用纵波探伤较合理,而当  $\delta < 10\text{mm}$  时,探伤声程较短,声波衰减较少,因此采用横波较好;

2) 与碳钢比较,超声波在奥氏体钢中的探伤灵敏度会大大降低,但考虑到在用压力容器的焊缝探伤是基于“合乎使用”的原则探伤,而奥氏体钢的强度,断裂韧性要好于碳钢,其允许的当量裂纹尺寸较之碳钢要大,即允许“漏检”的缺陷尺寸较大,如

果探伤发现的最小缺陷尺寸能满足容器的安全等级评定要求,则探伤方法是可行的。

综上所述,本次试验决定采用横波斜探头进行薄板奥氏体不锈钢焊缝探伤。

## 2 试验过程

1) 试块制作:采用厚度为  $3.7\text{mm}$ ,材料为 304,宽度  $30\text{mm}$ ,长度  $200\text{mm}$  的薄板,在长度为  $100\text{mm}$  处用线切割方法制作深度  $h$  分别为  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.2$ 、 $1.5$  的线切割槽的试板,如图 1 所示,试块表面为轧制状态。

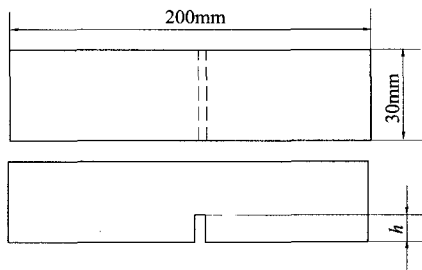


图 1 带有切割槽试板

2) 实验仪器:采用南京产 DUT—860C 数字超声探伤仪。

3) 扫描速度(时基线比例)的调节

先用碳钢制作的 CSK—IA 试块作零位校正和调整扫描速度,按水平 1:1 定位,然后在薄板试块上作扫描速度修正,由于超声波在不锈钢中的声速较碳钢低,故须向下调整扫描速度,例如在碳钢中的扫描速度为  $3319\text{m/s}$ ,不锈钢中的扫描速度为  $3069\text{m/s}$ 。

4) 为了测试各种类型的探头对薄板试块不同反射体的检测能力,对深度分别为  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.5$ 、

1.0、1.2、1.5 的线切割槽(槽长度 30mm)试块使用不同规格的探头进行测试,探头型号分别为:2.5P13×13K2、2.5P13×12K1.5、2.5P13×13K2.5、5P6×6K3、2.5P9×9K2、5P6×6K2.5,其中 2.5P13×13K2 探头测试结果见表 1。

表 1 不同型式探头测试结果

槽深/mm	位置一		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.1	1.0	7.3	-11.0
0.2	3.5	8.5	-7.1
0.5	3.9	8.7	7.0
1.0	3.9	8.7	6.3
1.2	4.3	8.9	9.6
1.5	4.3	9.2	8.6

槽深/mm	位置二		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.1	14.4	13.8	-15.8
0.2	14.4	13.8	-7.2
0.5	14.0	13.6	6.9
1.0	14.4	13.8	7.2
1.2	14.0	13.6	7.9
1.5	14.4	13.8	6.5

注:1. 波高均为该反射波与定量线的 dB 差,下同。(测试时距离-波幅曲线依据 JB 4730.3—2005 标准,采用 CSK-ⅢA 试块)

2. 深度是探伤仪显示的反射波深度,下同。

测试结果表明,对槽深 0.1mm 的人工缺陷,所有探头均基本无法发现缺陷反射波,信噪比基本为 1:1。对槽深 0.2mm 的人工缺陷,则基本能发现,对薄板厚度 3.7mm 而言,所有探头基本能发现 0.5mm 的线切割槽。相对而言,K 值大的探头探伤灵敏度优于 K 值小的探头(见表 2 及表 3),前沿短的要优于前沿长的探头。

5)以槽深 0.5mm,板厚为 3.7mm 的线切割槽的二、三次反射波为基准,制作距离-波幅曲线(见图 2),这里采用探头型号分别为 2.5P9×9K2、5P6×6K3、5P6×6K2.5,基准线为判废线,记作  $h_{0.5} \times 30$ (槽深×槽的长度),定量线  $h_{0.5} \times 32 - 6\text{dB}$ ,评定线与定量线相同。从试验可以看出,槽深 0.2mm 的反射波基本落在定量线上。

表 2 2.5P9×9K2 探头测试结果

槽深/mm	位置一		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	8.4	7.3	-2.9(反面)
0.5	8.9	7.5	5.7
1.0	7.7	7.0	10.9
1.2	6.9	6.8	11.0
1.5	3.6	5.4	15.2

槽深/mm	位置二		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	12.5	8.9	4.3(反面)
0.5	20.2	12.0	6.9
1.0	35.6	18.1	8.1
1.2	16.8	10.6	14.4(反面)
1.5	23.6	23.6	14.2

表 3 5P6×6K3 探头测试结果

槽深/mm	位置一		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	12.1	5.7	1.1
0.5	13.0	6.0	4.5
1.0	17.6	7.5	19.1
1.2	16.0	7.0	9.5
1.5	12.7	5.9	22.9

槽深/mm	位置二		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	20.0	8.3	3.1
0.5	55.4	20.1	18.9
1.0	6.1	3.7	23.2
1.2	20.6	8.5	21.9
1.5	7.0	4.0	25.6

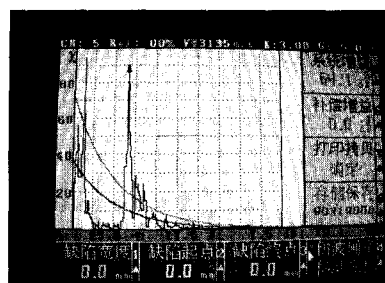


图 2 距离与幅度曲线

对不同槽深的薄板试块测试结果见表 2、表 3、表

4(表中的 dB 均指该反射波高与定量线 SL 的 dB 差)

表 4 5P6 × 6K2.5 探头测试结果

槽深/mm	位置一		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	5.7	4.3	8.3(反面)
0.5	18.7	9.5	7.2
1.0	4.7	3.9	12.0
1.2	6.2	4.5	15.9
1.5	6.4	4.6	16.6
槽深/mm	位置二		
	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
0.2	12.4	7.0	-0.5(反面)
0.5	3.9	3.6	4.6
1.0	9.4	5.8	9.1
1.2	28.2	13.3	13.9
1.5	4.7	3.9	12.8

注:表中没有特别注明的均为探测面在缺陷(线切割槽)的背面所得出的数据,反面表示探测面在缺陷(线切割槽)的同一面,下同。

从表 2 ~ 表 4 中可以看出,在反面测试时,反射波高较高,正面测试时反射波高较低,在测试 0.2mm 槽深时,甚至用正面找不到缺陷波,只能从反面检测出缺陷波(见表 4)这是因为当探头的折射角较大,探伤灵敏度较高,则有一部分能量转换成表面波,反面检测时(即缺陷位于探测面时)表面波与横波叠加的结果使其缺陷反射波讯号增强,因此,有利于发现探测面表面的开口缺陷(如表面裂纹),但也给缺陷的定量造成一定的误差,在实际探伤中当缺陷在探测面时,要引起注意。

#### 6) 对焊缝试块的测试

笔者制作了编号分别为 A01 ~ A5 共 5 块焊缝试块,试块包含有未焊透、未熔合、条渣、气孔等各种缺陷,还包括分别钻有  $\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、 $\phi 1\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  的人工孔,未焊透的深度为 1.8 ~ 1.9mm。

#### (1) 对未焊透类型试块的测试

对含有未焊透缺陷的 A03 试块(未焊透深度 1.8mm,试块厚度 4.0mm)各种类型的探头都能轻易检出,如探头型号为 5P6 × 6K3 的测试结果见表 5:

表 5 5P6 × 6K 测试结果

水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
30.4	11.8	30.0

(2) 对圆形缺陷的测试结果见表 6:

表 6 圆形缺陷测试结果

试块编号	探头型号	缺陷类型	水平距离/mm	深度/mm	波高/dB
A01	5P6 × 6K2.5	$\phi 2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔	6.9	4.8	5.2
		$\phi 1\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔	9.2	5.7	-1.3
	2.5P9 × 9K2	$\phi 2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔	8.3	9.4	2.8
		$\phi 1\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔	7.3	8.9	4.3(反面)
A05	2.5P6 × 6K3	$\phi 2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔 + 4mm 条孔	7.6	4.2	7.8
		$\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$ 孔	12.1	5.7	7.4
	2.5P9 × 9K2	$\phi 2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 孔 + 4mm 条孔	14.5	12.4	4.5
		$\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$ 孔	12.6	11.5	3.1

由表 6 可以看出,K3 探头(短前沿探头)对圆形缺陷的检出能力要比非短前沿的 K2 探头好,对  $\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$  孔,相差 4.2dB,其结果 K3 探头为判废线上,K2 探头为定量线与判废线之间,K2 探头的结果显然不如人意。

(3) 对 A05 焊缝缺陷的检测(试块厚度 3.0mm):

K3 及 K2 探头的测试结果见表 7:

表 7 K3、K2 探头测试结果

缺陷编号	水平距离/mm		深度/mm		波高/dB	
	K3	K2	K3	K2	K3	K2
1	30.2	18.6	11.7	15.9	14.3	15.6
2	10.6	12.6	5.2	13.0	6.7	3.3
3	—	—	—	—	—	—
4	7.6	9.0	4.2	11.2	7.8	3.1
5	8.2	5.1	4.4	9.3	6.1	3.7
6	5.2	12.0	3.4	12.7	3.0	1.9
7	6.4	—	3.8	—	7.1	—
8	12.1	21.6	5.7	17.3	7.4	2.1
9	11.5	11.1	5.5	12.2	4.0	2.4
10	7.3	5.1	4.1	9.3	6.0	2.8
11	15.7	12.0	6.9	12.7	8.2	2.8

注:短横线“—”表示该缺陷无法检出。

由表 7 可看出, 5P6 × 6K3 对缺陷的检出能力要明显好于 2. 5P13 × 13K2 探头。

### 7) 对在用压力容器的实测:

在对佛山市某公司在用容器的定期检验中, 发现多台容器存在快开门封头支座与筒体联接角焊缝开裂, 经着色探伤证实裂纹已穿透母材, 对 2 台容器(染色缸)进行超声波探伤, 结果如下: 对编号 24# 容器(板厚 6mm, 材料 316L)的检测情况见表 8:

表 8 24# 容器测试结果

检测面	缺陷水平距离/mm	缺陷深度/mm	缺陷波高/dB	指示长度/mm
外侧	26.2	10.4	SL + 30.0dB	15
内侧	11.6	10.5	SL + 9.1dB	20
内侧	4.8	7.2	SL + 6.1dB	20

测试使用 5P6 × 6K3 探头。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 以槽深 0.5mm 作为判废线的依据

由于薄板试块为 3.7mm, 槽深 0.5 mm 约为板厚的 13%。在用容器的安全状况等级评定中, 缺陷自身高度与板厚的比值是一项非常重要的指标, 根据《在用压力容器定期检验规则》, 对一般容器非圆形缺陷规定见表 9:

表 9 非圆形缺陷合格标准

一般容器非圆形缺陷			圆筒环缝非圆形缺陷		
未熔合	未焊透	条渣	未熔合	未焊透	条渣
$H \leq 0.1t$ 且 $\leq 2mm$	$H \leq 0.15t$ 且 $\leq 3mm$	$H \leq 0.2t$ 且 $\leq 4mm$	$H \leq 0.15t$ 且 $\leq 3mm$	$H \leq 0.2t$ 且 $\leq 4mm$	$H \leq 0.25t$ 且 $\leq 5mm$
$L \leq 2t$	$L \leq 3t$	$L \leq 4t$	$L \leq 4t$	$L \leq 6t$	$L \leq 12t$

其中  $H$  为缺陷自身高度,  $t$  为板厚。

对自身高度的测定, 从超声波波型来分又分为表面波法和横波法, 表面波法只适用于板厚  $\geq 10mm$  的情形(见《JB/T 10814—2007 无损检测 超声表面波检测》标准), 在横波法中, 常用直射波法测定, 但板厚  $< 10mm$  时, 直射波法受到很大局限, 甚至无法进行。因而, 采用当量法确定缺陷自身高度是较为简单可行的办法, 即根据容器的壁厚制作不同深度的矩形槽(线切割槽)为连续缺陷的指示高度, 如缺

陷波高与对比试块的波高相同, 对比试块的槽深即为缺陷的自身高度。

采用  $H/t = 3.7/0.5 = 13\%$  的薄板试块, 确定基准波高为判废线时, 即  $H/t = 13\%$  的缺陷波高是不可接受的, 考虑到实际探伤的误差, 因此可以保证  $H/t = 15\%$  的波高在判废线以上。当  $H/t \leq 10\%$  时, 波高在判废线以下, 通过测定指示长度, 判断缺陷性质等方法来判断缺陷合格与否, 从而满足《在用压力容器定期检验规则》对安全评定的要求。

### 3.2 探头的选择

对薄板试块的测试表明, 晶片尺寸较小, 探头前沿较短,  $K$  值较大的探头比用晶片尺寸大, 探头前沿长,  $K$  值小的探头具有更好的灵敏度, 更高的检测能力(见表 2、表 3)。

奥氏体不锈钢焊缝探伤时, 频率对衰减的影响很大, 频率愈高, 衰减愈大, 穿透力越低, 因此宜用较低的频率, 但较低的频率不利于探头的指向性和分辨力, 故频率又不能过低。一般对板厚为 3 ~ 6mm 的焊缝, 宜用较高的频率如 5MHz, 对 6 ~ 10mm 的焊缝, 宜用较低的频率如 2.5MHz。

### 3.3 对圆形缺陷的检测

超声波探伤对圆形缺陷的检出能力较非圆形缺陷的能力低, 在薄板奥氏体不锈钢焊缝中更明显(见表 6), 但是只要选用适当的探伤方式, 还是可以发现缺陷的。

### 3.4 对横波探伤使用范围为 $3 \leq \delta < 10mm$ 的依据

对试块 A05(板厚 3.0mm)焊缝探伤的结果, 证明板厚  $\geq 3mm$  时探伤仍是可行的, 当板厚为 10mm 时, 可用一、二次波探伤, 最大检测深度为 20mm。为了验证板厚为 10mm 时横波探伤的可行性, 笔者制作了板厚为 30mm, 手工焊的对比试块, 在试块焊缝的熔合线上钻有  $\phi 4mm$  的通孔, 通孔深度为 20mm。使用 5P6 × 6K2—D 探头测定通孔回波, 测定声速通过焊接接头金属, 测试结果见表 10:

表 10 5P6 × 6K2—D 探头测定通孔回波

水平距离/mm	深度/mm	波高/dB	增益/dB
27.0	16.4	17.3	52.1

根据 JB/T 4730.3—2005 超声检测标准表 N.1 的要求, 制作出距离—波幅曲线, 其评定线灵敏度

为  $\phi 2\text{mm} \times 30 - 18\text{dB}$ 。按长横孔回波声压公式,长横孔距离一定直径增加一倍,回波上升 3dB。因此,  $\phi 4$  长横孔相应的评定线灵敏度为  $\phi 4\text{mm} \times 30 - 21\text{dB}$ ,实测结果该反射波对定量线的 dB 差为 17.3dB。对评定线的 dB 差为  $17.3 + 4\text{dB} = 21.3\text{dB}$ ,与理论结果非常吻合,该仪器的增益范围为 0 ~ 100dB,对  $\phi 4\text{mm}$  通孔的测定时实际增益为 52.1dB,还有 47.9dB 的增益余量(对应按 JB/T 4730.3—2005 标准评定线来比较)。因此,当板厚为 10mm 使用横波探伤,其灵敏度是满足要求的。

### 3.5 缺陷判别与测定

薄板奥氏体不锈钢焊缝探伤中,主要是根据反射波的水平位置来判别缺陷,其缺陷判别与测定与一般的横波探伤法相同,由于焊缝较窄,板厚较薄,杂波较多,因此要求调机时定位精度更高,否则易造成误判。

## 4 结束语

1) 经实验表明,对板厚为 3 ~ 10mm 的在用压力

容器奥氏体不锈钢对接焊缝及母材,从“合乎使用”的角度出发,采用超声横波探伤是可行的。我们在检测实践中,经常会发现奥氏体不锈钢容器在对接焊缝,封头扳边处,支座角焊缝母材等处存在各种形式的裂纹,如果辅以超声波探伤,可以及时发现这些缺陷,避免出现容器的失效事故,因此对在用压力容器的安全运行具有重要的意义。

2) 实际探伤中还极有可能漏检一些  $\phi 1 \sim \phi 2$  甚至更大的圆形缺陷,这有待今后作进一步的研究。可以庆幸的是,从安全角度考虑,圆形缺陷对于一般的奥氏体不锈钢压力容器不构成多大的危害。

3) 超声横波探伤不仅对在用压力容器薄板奥氏体不锈钢对接焊缝探伤具有实用性,对板厚为 3 ~ 6mm 的在用压力容器碳钢对接焊缝也可应用(主要在于两者的声速不同,经适当调整和相应的试块配套就可应用,而且更具操作性),这方面的试验有待日后进行。

(收稿日期 2009-05-20)

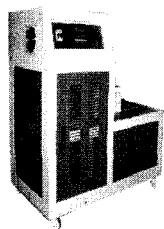
## 广告



济南普业

Jinan Pu Ye Electrical and Mechanical Technology Co., Ltd.

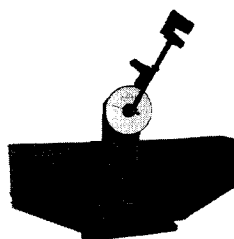
## 济南普业机电技术有限公司 (济南康华试验机制造有限公司)



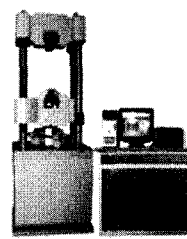
CDW-60 冲击试样低温仪



WE-300A 度盘液压  
万能试验机



WD-P 液晶屏显  
电子拉力试验机



WAW-B 微机控制电液  
伺服万能试验机

### 产品目录:

1. 液晶数显电子万能试验机;
2. 微机控制电子万能试验机(普通、闭环);
3. 微机屏显液压万能试验机(WEW 系列);
4. 微机控制电液伺服万能试验机(WAW 系列);
5. 摩擦磨损试验机(端面、四球、端销等);
6. 冲击试验机(JB 系列、CSL 系列);
7. 低温试验机;
8. 杯突试验机(液晶数显、微机控制);
9. 钢筋、钢管弯曲试验机;
10. 端淬试验机;
11. 扭矩测试仪;
12. 压力试验机(建筑、通用);
13. 包装试验机(拉力、压力、摩擦系数等);
14. 各种试验机改造、升级、维修(电子试验机、液压试验机等);

地址: 山东省济南市槐荫区清河北路新沙工业园南区 邮箱: testhan@163.com 网址: www.17w18.com、www.jnpuye.com  
电话: 0531-86310977、85982978、85961536 邮编: 250032 传真: 0531-86310789、85965220