

# 长横孔与短横孔试块研究

雷胜军<sup>1</sup>, 刘国普<sup>2</sup>, 孙 宏<sup>2</sup>

(1. 浙江省特种设备检验中心, 杭州市, 310020; 2. 葛洲坝集团公司, 湖北省宜昌市 443002)

**[摘 要]** 我国压力容器无损检测标准 JB4730—94 规定的标准反射体有长横孔和短横孔 2 种试块, 2 种试块对超声波反射规律的研究表明, 由此可能引起对缺陷评定的矛盾, 因此, 2 种试块并存在 1 个标准中是不合理的。通过 2 种试块的比较, 并参照国外标准, 建议在标准修订时只保留 1 种长横孔试块, 即 CSK-1A 试块。

**[关键词]** 超声波探伤 长横孔试块 短横孔试块

中图分类号: TG115.28<sup>+</sup>5 文献标识码: B 文章编号: 1000-7229(2004)06-0014-03

## Study on Reference Blocks with Long-horizontal and Short-horizontal Holes

Lei Shengjun<sup>1</sup>, Liu Guopu<sup>2</sup>, Sun Hong<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection Center, Hangzhou, 310020; 2. Gezhou Dam Groups Corporation, Yichang Hubei, 443002)

**[Key words]** ultrasonic detection; reference block with long horizontal hole; reference block with short horizontal hole

在对焊缝进行超声波探伤时, 一般应用距离-波幅曲线对缺陷进行定量。制作距离-波幅曲线时, 需要一个参考反射体。我国压力容器无损检测标准 JB4730—94 规定的标准反射体有 CSK-1A 试块和 CSK-1A 试块 2 种, 即  $\phi 2 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  长横孔试块和  $\phi 1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  短横孔试块。由于长横孔和短横孔对超声波的反射规律不同, 两者的距离-波幅曲线不平行, 短横孔的曲线斜率大于长横孔的曲线斜率, 因此两者的距离-波幅曲线必然相交。由此可能引起对缺陷评定的矛盾: 在焊缝中检出的缺陷, 若回波声程在交点前, 用短横孔判定合格而用长横孔判定不合格; 若回波声程在交点后, 用短横孔判定不合格而用长横孔判定为合格。因此在 1 个标准中规定 2 个标准反射体存在矛盾。究竟采用哪种标准反射体比较好呢? 本文对这一问题进行探讨。

### 1 长横孔与短横孔的反射规律<sup>[1,2,3,4]</sup>

为了研究长横孔与短横孔的声压反射规律, 在此引入人工缺陷声压反射率的概念。人工缺陷声压反射率  $r$  定义为: 人工缺陷返回声压与大平底面返回声压之比, 如图 1 所示。根据定义有:

$$r = \left| \frac{P_f}{P_b} \right|$$

式中  $P_f$  ——人工缺陷返回声压;

$P_b$  ——大平底返回声压。

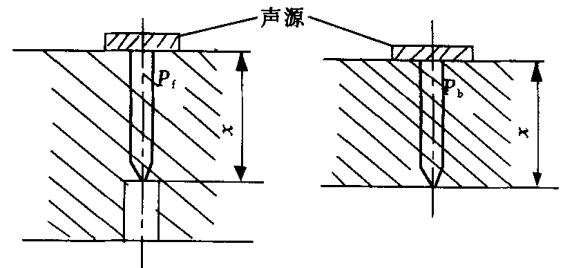


图 1 人工缺陷声压反射率的定义

对于圆柱形人工缺陷, 设其直径为  $2a$ , 长度为  $2b$ , 如图 2 所示。当  $2a > 0.7$ ,  $2b > 0.7$  时, 声波垂直于圆柱的轴线入射时的反射率由下式给出:

$$r = \frac{\sqrt{2a}}{\sqrt{a+x}} \sqrt{S^2(b) + C^2(b)} \quad (1)$$

$$b = 2b / \sqrt{x}$$

式中  $\lambda$  ——波长;

$S(b)$ 、 $C(b)$  ——菲涅尔函数, 其定义为:

$$S(b) = \int_0^b \sin \frac{t^2}{2} dt$$

$$C(b) = \int_0^b \cos \frac{t^2}{2} dt$$

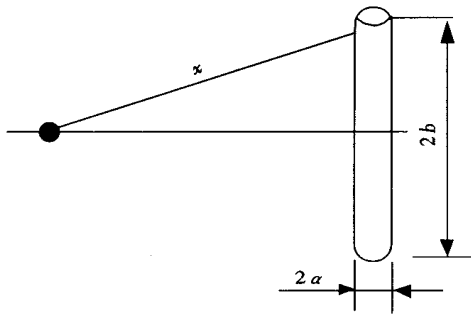


图 2 圆柱形人工缺陷

当孔长满足  $2b \geq 4\sqrt{x}$ , 误差在 1 dB 内时, 反射率为:  $r = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{a+x}}$  (2)

对于长横孔, 其反射率可用 (2) 式计算。

当孔长满足  $0.8\sqrt{x} \leq 2b \leq 0.7$ , 误差在 1 dB 内时, 反射率为:

$$r = 2\sqrt{2} \frac{\sqrt{ab}}{\sqrt{(a+x)x}} \quad (3)$$

对短横孔,  $2a = 1 \text{ mm}$ ,  $2b = 6 \text{ mm}$ , 当声程  $x = 43.8 \text{ mm}$  时,  $0.8\sqrt{x} \approx 6$  成立, 其反射率可由 (3) 式计算。

大平底的回波声压  $P_b$ , 当  $x \geq 3N$  ( $N$  为近场区长度) 时, 有:

$$P_b = \frac{P_0 F_s}{2x} \quad (4)$$

式中  $P_0$  —— 探头波源的起始声压;

$F_s$  —— 探头波源的面积。

由 (2)、(3)、(4) 式可推出长横孔的回波声压为:

$$P_f = \frac{P_0 F_s}{2x} \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{a+x}} = \frac{P_0 F_s}{2x} \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{x}} \quad (5)$$

短横孔的回波声压为:

$$P_f = \frac{P_0 F_s}{2x} 2\sqrt{2} \frac{\sqrt{ab}}{\sqrt{(a+x)x}} = \frac{P_0 F_s}{x^2} \sqrt{2ab} \quad (6)$$

比较 (5) 式和 (6) 式, 可见两者对超声波的反射规律不同, 长横孔回波声压与长横孔的直径平方根成正比, 与距离的  $3/2$  次方成反比; 短横孔的回波声压与短横孔长度的平方根成正比, 与直径的平方根成正比, 与距离的平方成反比。

根据 (5) 式和 (6) 式可以推出长横孔与短横孔的回波分贝差值为:

$$= 20 \lg \frac{P_{f1}}{P_{f2}} = 20 \lg \frac{\sqrt{a_1 x}}{\sqrt{a_2 b}} = 10 \lg x - 10.8 \quad (7)$$

令 (7) 式等于 0, 可求得  $x = 12/$ , 可见两者的理论回波曲线存在交点, 因而根据这 2 条曲线平移作出的距离 - 波幅曲线也必然相交。

## 2 实验

为验证上述分析, 我们用 2.5PI3  $\times$  13KI 的探头分别在 CSK-A 长横孔试块和 CSK-A 短横孔试块上测出了不同孔深对应的回波分贝值, 其数据见表 1。根据表 1 的数据做出的距离 - 波幅曲线见图 3。实验数据证明, 2 条曲线确实是相交的。因此, 在 1 个标准中规定 2 个参考反射体是不妥当的。

表 1 长横孔与短横孔的回波分贝值

孔深/mm	长横孔回波/dB	短横孔回波/dB
10	63.4	58.2
20	63.8	59.5
30	62.6	56.9
40	61.8	54.0
50	59.8	50.8
60	57.4	47.3
70	55.2	44.6
80	53.3	42.4
90	52.0	40.2
100	50.1	38.0

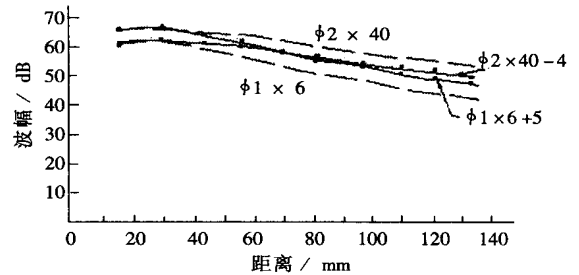


图 3 根据实验数据做出的距离 - 波幅曲线

## 3 2 种试块比较

### 3.1 对缺陷的模拟比较

焊缝中常见的缺陷有气孔、夹渣、未熔合、未焊透、裂纹等。不同性质的缺陷对超声波的反射规律不同, 即使同一类型的缺陷, 其形状不同, 对超声波的反向规律也会不同。因此要采用某一种人工缺陷来模拟所有缺陷的反射规律是不现实的, 只能是某种程度上的近似。从常识上判断, 我们认为尺寸大的缺陷其反射规律可能与长横孔接近些, 小尺寸的缺陷其反射规律可能与短横孔相似。在焊缝中, 小尺寸缺陷出现的概率远大于大尺寸的缺陷, 但是在探伤中, 一般只能检出尺寸较大的缺陷, 小缺陷一般难于检出, 从这一点看, 采用长横孔合理些。

### 3.2 使用、加工方面的比较

由于 CSK-A 试块的外形尺寸不是固定的, 根据被检材料的不同厚度, 需要加工几块试块; 而且

此试块只有 1 个孔,测不同声程的回波分贝时,要分别找 1 次回波,2 次回波,3 次回波, ..., 操作起来比较繁琐。因此,从使用方面来看,CSK - A 试块要优越些。从加工方面来看,CSK - A 试块要在侧面加工出圆弧,且钻的孔也小,因此加工难度要大于 CSK - A 试块。

### 3.3 对缺陷评定方面的比较

JB4730—94 规定的距离 - 波幅曲线灵敏度见表 2。

表 2 距离 - 波幅曲线的灵敏度

试块型式	板厚/mm	评定线	定量线	判废线
CSK - A	8 ~ 46	$\phi_2 \times 40 - 18\text{dB}$	$\phi_2 \times 40 - 12\text{dB}$	$\phi_2 \times 40 - 4\text{dB}$
	> 46 ~ 120	$\phi_2 \times 40 - 14\text{dB}$	$\phi_2 \times 40 - 8\text{dB}$	$\phi_2 \times 40 + 2\text{dB}$
CSK - A	8 ~ 15	$\phi_1 \times 6 - 12\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 - 6\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 + 2\text{dB}$
	> 15 ~ 46	$\phi_1 \times 6 - 9\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 - 3\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 + 5\text{dB}$
	> 46 ~ 120	$\phi_1 \times 6 - 6\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 - 0\text{dB}$	$\phi_1 \times 6 + 10\text{dB}$

对板厚  $T = 8 \sim 15 \text{ mm}$  的薄板,选用  $K2 \sim K3$  的探头,采用一次反射法或串列式探伤,则探伤声程  $x$  在  $32 \sim 90 \text{ mm}$  之间。

对  $15 \text{ mm} < T < 25 \text{ mm}$  的中厚板,选用  $K2 \sim K3$  的探头,采用一次反射法或串列式探伤,则声程  $x$  在  $60 \sim 150 \text{ mm}$  之间;对  $25 \text{ mm} < T < 46 \text{ mm}$  的中厚板,选用  $K1.5 \sim K2.5$  的探头,采用一次反射法或串列式探伤,则探伤声程  $x$  在  $75 \sim 230 \text{ mm}$  之间。即对  $15 \sim 46 \text{ mm}$  的中厚板,探伤声程在  $60 \sim 230 \text{ mm}$  之间。

对  $46 \sim 120 \text{ mm}$  的厚板,一般选择  $K1 \sim K2$  的探头,采用直射法探伤,则探伤声程在  $46 \sim 240 \text{ mm}$  之间。

以判废线为例来比较短横孔和长横孔对缺陷判废的松与紧。当超声波频率为  $2.5 \text{ MHz}$  时,由表 2 和(7)式可计算得出:对  $8 \sim 15 \text{ mm}$  的薄板, $\phi_1 \times 6 + 2\text{dB}$  曲线与  $\phi_2 \times 40 - 2\text{dB}$  曲线约在声程为  $x = 37 \text{ mm}$  处相交,如图 4(a) 所示;对  $15 \sim 46 \text{ mm}$  的中厚板, $\phi_1 \times 6 + 5 \text{ dB}$  曲线与  $\phi_2 \times 40 - 4\text{dB}$  曲线约在声程  $x = 74 \text{ mm}$  处相交,如图 4(b) 所示;对于  $46 \sim 120 \text{ mm}$  的厚板, $\phi_1 \times 6 + 10\text{dB}$  曲线与  $\phi_2 \times 40 + 2\text{dB}$  曲线约在声程  $x = 59 \text{ mm}$  处相交,如图 4(c) 所示。

从图 4 可以看出,不论薄板、中厚板还是厚板,探伤声程有位于短横孔判废线和长横孔判废线的交点之前的,但大部分是位于交点之后的。因此在焊缝中检出的缺陷,若回波声程在交点前,用短横孔判定合格而用长横孔判定不合格;若回波声程在交点后,用短横孔判定不合格而用长横孔判定为合格。

多数情况下用短横孔评判缺陷要比长横孔评判严格。

### 3.4 其他方面的问题<sup>[5]</sup>

CSK - A 短横孔试块由于厚度只有  $25 \text{ mm}$ ,一般斜探头的声场在不太远的声程处,其声束边缘已经达到试块的两侧,引起了侧壁反射,产生了干扰。短横孔试块侧面开了 1 个圆弧槽,对克服侧面反射有好处,但不能完全消除。

## 4 国外超声波探伤标准中的相应规定

英国焊缝超声波探伤标准 BS3923. 1—86 规定, DAC 曲线(即距离 - 波幅曲线)绘制采用  $\phi_3 \text{ mm}$  横通孔试块。

欧洲标准 EN1714 - 98 和 EN1712 - 97 亦规定, DAC 曲线绘制采用  $\phi_3 \text{ mm}$  长横孔或深  $1 \text{ mm}$  的矩形槽。

美国 ASTM E164—81 标准规定,绘制 DAC 曲线采用长横孔,孔深至少达到  $38 \text{ mm}$ ,如有可能,应达到  $51 \text{ mm}$ ,孔径随焊缝厚度变化而改变。

德国标准 DIN54125—82 标准采用长横孔,不推荐采用平底孔和方槽调节反射体。

日本采用平底孔和长横孔 2 种形式,在造船和建筑结构体等方面普及平底孔试块,在锅炉和压力容器等方面普及长横孔试块。

参照国外的标准来看,采用长横孔制作 DAC 曲线最为普遍,我国是唯一采用短横孔的国家。

## 5 结论和建议

5.1 短横孔和长横孔对超声波的反射规律不同,两者的距离 - 波幅曲线相交。对同一个缺陷,用 2 种试块评判会得出不同的结论。因此,2 种试块并存于 1 个标准中不合理。

5.2 在缺陷的模拟和试块的加工方面,长横孔试块优于短横孔;在使用方面短横孔试块比长横孔方便,但存在侧壁干涉和端角反射现象。综合比较,长横孔试块的优点要突出些。

5.3 不论薄板、中厚板还是厚板,多数情况下用短横孔评判缺陷比用长横孔评判缺陷严格。

5.4 采用短横孔是我国超声波探伤标准独有的规定,在国际交往中难以被国外同行接受。现在我国已经加入世贸组织,为了促进我国锅炉压力容器行业的国际交流与合作,建议在标准修订时只保留 1 种长横孔试块,即 CSK - A 试块。

(下转第 23 页)

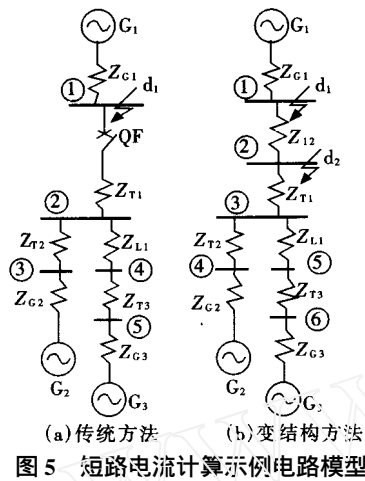


图 5 短路电流计算示例电路模型

此电流为注入短路点的总电流,流过断路器的电流需通过其他途径计算,其值为:

$$\dot{I}_{QF} = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{Z_{T1}} = -j11.73$$

### 5.2 采用变结构的方法

首先将断路器模拟成阻抗为无穷大 ( $Z_{l2} = \infty$ ) 的支路,建立电路模型,如图 5 (b) 所示。列出节点导纳矩阵  $Y_2$ :

$$Y_2 = \begin{bmatrix} -j5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j3 & j3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j3 & -j14.51 & j6 & j5.51 & 0 \\ 0 & 0 & j6 & -j11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j5.51 & 0 & -j8.51 & j3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j3 & -j8 \end{bmatrix}$$

当在节点 1、2 处发生三相短路时,有  $\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = 0$ , 设其短路电流分别为  $\dot{I}_{Fd1}$ 、 $\dot{I}_{Fd2}$ , 则有:

$$Y_2 \dot{V} = \dot{i} - \dot{I}_F$$

式中,  $\dot{V} = [\dot{V}_1 \dot{V}_2 \dot{V}_3 \dot{V}_4 \dot{V}_5 \dot{V}_6]^T$  为节点电压向量,  $\dot{i} = [-j500 \quad -j50 \quad -j5]^T$  为节点电流向量,  $\dot{I}_F = [\dot{I}_{Fd1} \quad \dot{I}_{Fd2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$  为短路点的短路电流向量。由此解得:  $\dot{I}_{Fd1} = -j27.5$ , 此电流就是在  $d_2$  处短路时,通过 QF 的短路电流;  $\dot{I}_{Fd2} = -j11.73$ , 此电流就是在  $d_1$  处短路时,通过 QF 的短路电流。

因此,在利用计算机计算时,必须注意交换 2 个短路点的短路电流数值。

## 6 结论

变结构电网短路电流计算方法,与传统的计算机故障分析方法相比,在系统模型的选择上具有一致性,因此,具有传统的计算机故障分析方法的优点,可以处理任意的故障情况。同时,它又克服了传统的计算机故障分析方法的一些不足,一方面它可以直接求出在设备两侧短路时,流过设备的短路电流,这给电气设备选择、继电保护的整定计算带来了极大的方便,另一方面,还能考虑系统运行方式的改变对故障电流的影响,应用前景广阔。

## 7 参考文献

- 1 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析. 清华大学出版社,1996
- 2 何仰赞,温增银,等. 电力系统分析(修订版). 华中理工大学出版社,1995

(责任编辑:李汉才)

(上接第 16 页)

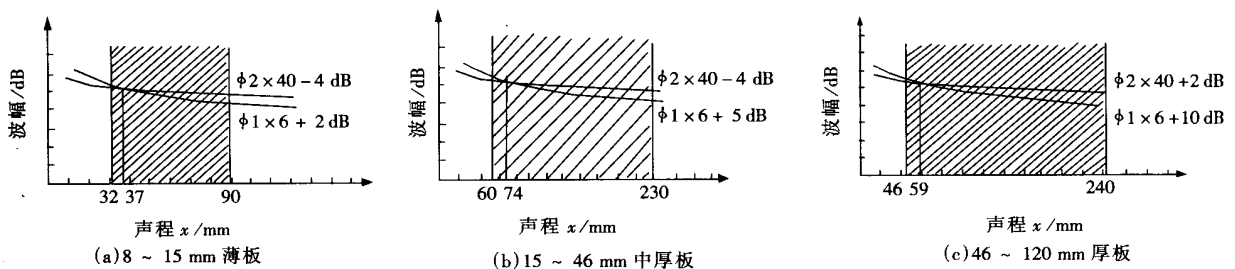


图 4 各种板厚的距离 - 波幅曲线的交点和对应的探伤声程范围

## 6 参考文献

- 1 李靖,等译. 超声探伤法. 广东科技出版社,1981
- 2 胡天明. 超声探伤. 武汉测绘科技大学出版社,1994

- 3 李以善. GB11345—89 和 JB1152—81 缺陷定量灵敏度的比较. 无损检测,1994(3)
- 4 郝冰. 关于 GB11345—89 探伤灵敏度的讨论. 无损探伤,1992(6)
- 5 马铭钢. 超声波探伤中 2 个值得反思的问题. 无损检测,1998(12)

(责任编辑:李汉才)