

# 管材焊缝超声波检测中缺陷的定位

巨西民<sup>1</sup>, 莫润阳<sup>2</sup>, 姚欢<sup>3</sup>, 罗华权<sup>3</sup>, 蒋承君<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学, 西安 710049; 2. 陕西师范大学 陕西省超声学重点实验室, 西安 710062;  
3. 中国石油管材研究所, 西安 710065)

**摘要:** 基于管材焊缝超声一次波检测中缺陷的定位公式, 分析了由探头  $K$  值和工件尺寸变化产生的定位误差, 指出几种减小定位误差的修正方法; 并对数字型仪器缺陷定位的原理及在实际检测中注意的问题进行了讨论。

**关键词:** 管材焊缝; 超声检测; 缺陷定位

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)11-0877-03

## The Defect Location in Ultrasonic Testing of Weld on Pipe

JU Xi-Ming<sup>1</sup>, MO Run-Yang<sup>2</sup>, YAO Huan<sup>3</sup>, LUO Hua-Quan<sup>3</sup>, JIANG Cheng-Jun<sup>3</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;  
3. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Based on the defect location formula of ultrasonic primary wave testing of weld on pipe, the location error caused by  $K$  value of angle probe or size of work piece were analyzed, and several correction methods were put forward. The principle of defect location by digital instrument and attention in actual testing were discussed as well.

**Keywords:** Weld on pipe; Ultrasonic testing; Defect Location

缺陷的定位是焊缝超声探伤中最为重要的环节。对于管道焊缝, 很多属于圆柱曲面周向横波探伤, 由于探头的扫查轨迹在曲面上, 要求提供的定位参数与声程属非线性关系, 因此不能采取与平面探伤相同的简单定位方法, 必须利用缺陷反射信号得到的相当于平板工件深度, 并结合探头  $K$  值和工件具体尺寸(曲率半径及厚度)等数据, 经过计算才能对缺陷准确定位, 一般探伤人员较难掌握, 且在实际探伤时很容易产生误差, 并导致误判和漏检。此外, 在目前执行的相关标准中, 也未对此类工件的缺陷定位方法作出规定。因此, 探伤人员在实施探伤时, 大多按照自身选择的定位方法对缺陷定位<sup>[1]</sup>。

## 1 缺陷定位公式及误差分析

厚壁大口径管材的曲面焊缝超声探伤中, 当满

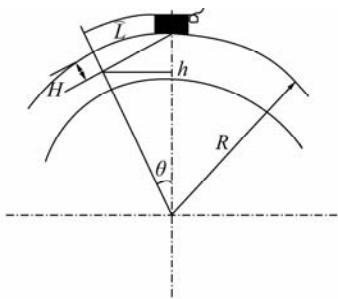


图 1 外圆面一次波探伤缺陷定位

足几何条件而采用平板试块调节仪器扫描时(图 1), 缺陷定位公式为:

$$H = R - \sqrt{(Kh)^2 + (R-h)^2} \quad (1)$$

$$\hat{L} = R \cdot \operatorname{tg}^{-1} \frac{Kh}{R-h} \quad (2)$$

式中  $H$ —缺陷径向深度;

$\hat{L}$ —缺陷距声束入射点的表面弧长;

$K$ —探头折射角的正切值;

$R$ —管材外半径;

$h$ —按深度调节时探伤仪显示的缺陷深度。

收稿日期: 2009-11-09

作者简介: 巨西民(1956—), 男, 博士研究生, 主要进行金属材料无损检测技术研究, 从事现场石油管材和油气储罐无损检测工作。

从式(1)和(2)中可以看出,利用平板工件调整扫描参数,缺陷定位的准确性与工件几何因素、探头参数有关。为了更进一步分析各因素对定位准确性影响的差异,利用数学分析的方法对定位误差进行定量分析。

### 1.1 $H$ 及 $\hat{L}$ 随探头 $K$ 值的变化

$H$  随  $K$  的变化率  $\frac{dH}{dK}$  及因  $K$  变化产生的误差  $\Delta H$  为:

$$\frac{dH}{dK} = \frac{Hh^2}{\sqrt{(Kh)^2 + (R-h)^2}} \quad (3)$$

$$\Delta H = \frac{dH}{dK} \Delta K = -\frac{Kh^2}{\sqrt{(Kh)^2 + (R-h)^2}} \cdot \Delta K \quad (4)$$

$\hat{L}$  随  $K$  的变化率  $d\hat{L}/dK$  及因  $K$  变化产生的误差  $\Delta\hat{L}$  为:

$$\frac{d\hat{L}}{dK} = \frac{R \cdot h \cdot (R-h)}{(Kh)^2 + (R-h)^2} \quad (5)$$

$$\Delta\hat{L} = \frac{d\hat{L}}{dK} \cdot \Delta K = R \cdot h \cdot \frac{R-h}{(Kh)^2 + (R-h)^2} \cdot \Delta K \quad (6)$$

由式(3)~(6)可见,外圆周向检测焊缝时,缺陷的径向深度和表面弧长随探头  $K$  值变化率不同,即探头  $K$  值的变化对缺陷定位弧长和径向深度的影响不同;而且探头  $K$  值变化,对表面弧长影响较对深度定位影响大。

### 1.2 $H$ 及 $\hat{L}$ 随管材外径 $R$ 的变化

$H$  随  $R$  的变化率  $dH/dR$  及因  $R$  变化产生的误差  $\Delta H$  为:

$$\frac{dH}{dR} = 1 - \frac{R-h}{\sqrt{(Kh)^2 + (R-h)^2}} \quad (7)$$

$$\Delta H = \frac{dH}{dR} \cdot \Delta R = \left[ 1 - \frac{R-h}{\sqrt{(Kh)^2 + (R-h)^2}} \right] \cdot \Delta R \quad (8)$$

$\hat{L}$  随  $R$  的变化率  $d\hat{L}/dR$  及因  $R$  变化产生的误差  $\Delta\hat{L}$  为:

$$\frac{d\hat{L}}{dR} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Kh}{R-h} - \frac{K \cdot R \cdot h}{(Kh)^2 + (R-h)^2} \quad (9)$$

$$\Delta\hat{L} = \frac{d\hat{L}}{dR} \cdot \Delta R = \Delta R \cdot \left[ \operatorname{tg}^{-1} \frac{Kh}{R-h} - \frac{K \cdot R \cdot h}{(Kh)^2 + (R-h)^2} \right] \quad (10)$$

由式(7)~(10)可见,外圆周向检测焊缝时,缺陷的

径向深度和表面弧长随管子外半径  $R$  变化率不同,即管子外半径  $R$  的变化对缺陷定位弧长和径向深度的影响不同;比较式(3)~(10)发现,管材外径的变化对定位误差的影响较  $K$  值变化带来的误差小。为保证缺陷定位的准确性,管材焊缝检测前,必须进行探头  $K$  值的测量。

## 2 实际应用中的修正方法

为提高曲面工件缺陷定位的准确性,使缺陷定位方法简单、方便、实用,发展了多种便捷的定位方法,如计算法、曲线定位法和曲面调节法等。

### 2.1 计算法

利用缺陷反射信号得到的相当于平板工件深度,并结合使用探头  $K$  值和工件具体尺寸(曲率半径及厚度)等数据,经计算可得缺陷准确定位。实用中为了方便起见,引入外圆面探伤深度修正系数  $\xi$  和弧长修正系数  $\epsilon$ ,分别为:

$$\xi = \frac{H}{h} = \frac{R}{h} - \sqrt{K^2 + \left( \frac{R}{h} - 1 \right)^2} \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{\hat{L}}{L} = 0.0174 \frac{1}{K} \cdot \frac{R}{h} \operatorname{tg}^{-1} \frac{K}{\frac{R}{h} - 1} \quad (12)$$

由式(11)~(12)可知,  $\xi$  和  $\epsilon$  是探头  $K$  值和工件外半径  $R$  及缺陷显示的平板工件深度  $h$  的函数,当  $K$  和  $R/h$  值确定后,  $\xi$  和  $\epsilon$  即可确定。用  $\xi$  和  $\epsilon$  表示外圆周向探测的缺陷位置用式(13)和(14)表示:

$$H = \xi h \quad (13)$$

$$\hat{L} = \epsilon L = \epsilon K h \quad (14)$$

### 2.2 曲线定位法

利用计算法对缺陷定位过程复杂,操作性不强,一般探伤人员较难掌握,在实际探伤时可采用由式(13)和(14)得到的缺陷定位曲线(图 2 和 3)进行查对,可免去繁琐的计算。这种定位曲线是在曲率半径、工件厚度和探头  $K$  值确定的前提下,对某工件

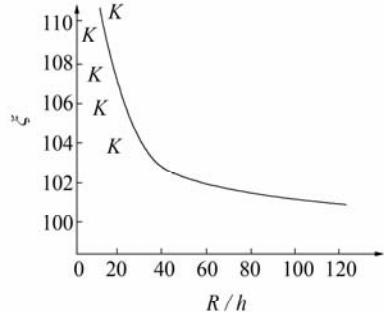
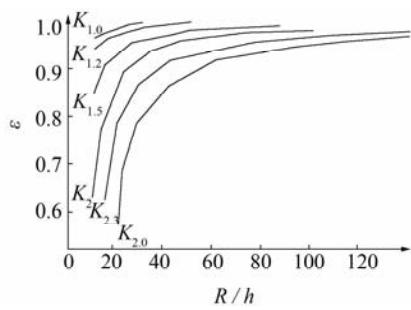


图 2  $\xi$  随  $R/h$  的变化关系

图 3  $\epsilon$  随  $R/h$  的变化关系

制定专用的近似定位曲线,供实际探伤时查用。该方法虽然带来一定的方便性,但当曲率半径、工件厚度和探头  $K$  值中的一项变化时,就必须重新制作曲线。姚志忠<sup>[1]</sup>经过多年实践,总结出圆柱曲面周向横波探伤缺陷定位通用曲线,不仅提高了定位准确性,且提高了功效。

由图 2 和 3 可见,当  $R/h > 30$  时,  $\epsilon$  趋于相同;当  $R/h < 30$  时,  $\epsilon$  趋于相近,因此使用  $\epsilon$  可不考虑  $K$  的变化。

### 2.3 曲面工件调节法

实际工作中,对管材焊缝,当进行外圆周向检测时,还可利用与待检管材材质、规格相同的对比样管调整扫描参数以减小表面弧长误差。对比样管的内外刻槽或竖通孔的下、上端角来调整扫描参数。内、外刻槽最高反射回波位置所对应的表面弧长类比于平板工件上人工反射体的水平距离,可据此按弧长调节仪器扫描参数,一旦发现缺陷,则仪器上可直接显示出缺陷的定位表面弧长。

在此应注意,不同形态的缺陷,最高反射回波位置会发生变化,若利用数字仪器显示缺陷的位置,则缺陷显示位置的准确性发生变化。

## 3 缺陷形态对定位显示的影响

### 3.1 不同形态缺陷反射特征

从资料[3]试验结果知,对于孔型缺陷,如果探伤面没有焊缝余高等几何条件限制,探头扫查时缺陷的最高反射点在主波束中心轴线上。当用不同值的探头探测同一孔型缺陷时,移动探头,当探头主波束中心轴对准缺陷时,反射波最高,因此对于孔型缺陷,当采用不同  $K$  值的探头进行探测时,最高反射点出现时的探头位置将不一样,声程也不相同。油气输送管焊缝检测时,API 标准中规定对比样管中的人工反射体通常采用竖通孔,这种类型缺陷具有轴对称特点,反射波幅比较稳定,可适用于各种  $K$  值探头。

对于倾斜平面型缺陷(如机械加工的刀角、裂纹、未焊透和未熔合),由于反射具有方向性,其最高反射点取决于平面缺陷的取向和探头声场的位置,也就是说在横波声场中,倾斜平面的最大反射点不一定在主波束中心轴线上。采用不同  $K$  值探头检测时,反射波达最高时的入射点随  $K$  值增大而后移,声程也随之增大,但增加幅度不大,且最高反射点的位置基本一致,声程基本相等,即对不同  $K$  值的探头,其水平定位、声程基本不变。这样,平面缺陷的定位、定量分析不能在中心轴  $K$  值基础上进行。若仍以主波束中心轴线上的值对缺陷进行定位、定量分析,就会出现误判或错判,从而影响检验质量。API 标准中规定对比样管中的人工反射体也常采用刻槽,如 V 型槽和其他切割槽,这类缺陷具有表面开口的线性缺陷的特点,常用于钢板、钢管和锻件等工件的横波检测,也可模拟其他工件或焊缝表面或近表面缺陷以调整检测灵敏度。检测或校准时,通常采用  $K1$  斜探头,根据需要,也可采用其他  $K$  值探头。

### 3.2 数字型探伤仪检测时缺陷定位原理

多年来,焊缝的超声检测都是采用由 CRT 显示、A 扫描波形的模拟型探伤仪,它有尺寸大、功耗多、强光下难观察,在探测距离大、重复频率低时扫描线很暗等缺点。但同时它又有调节简单、分辨率高、可观察与感知缺陷波形的优点,仍有很多探伤人员愿意使用这类仪器。近年,随着对测量精度要求的提高和希望能够记录检验数据与产生检测报告功能等,促进了数字超声波探伤仪的发展。数字超声波探伤仪具有可存储与调出检验参数、计算缺陷坐标位置、存储缺陷波形与打印检验结果等功能,其速度可做到随探、随显、随存的水平,使缺陷定位变得更加方便快捷。

但必须明白,在焊缝检验过程中,利用超声横波对焊缝中缺陷的定位、定量分析,都是以主波束中心轴线为基准的。数字仪器中用于自动计算缺陷位置的功能也是以主波束中心轴线为基准的,声程  $s$ 、表面水平距离  $L$  与缺陷埋藏深度  $h$  的关系如图 4。

探伤扫查中,移动探头,当探头主波束中心轴与缺陷平面垂直时,反射波最高(图 5),此位置即为缺陷位置。若缺陷的最高反射点不在主波束中心轴线上,则缺陷定位出现误差。在圆弧面上检验也一样,当在预设参数中输入所检测工件的外径、壁厚,计算

(下转第 883 页)

表4 红外探伤原始图像的缺陷参数

缺陷	面积/mm <sup>2</sup>	面积误差/%	重心	周长/mm	平均直径/mm	直径误差/%	长径/mm	短径/mm
1	155.46	27.25	(34.92 142.7)	40.85	13.20	10	13.56	12.75
2	974.24	12.21	(74.34 104.3)	110.71	33.92	2.788	34.76	33.12
3	378.83	17.07	(111.8 22.19)	79.48	20.78	3.95	21.26	20.36

内容,处理方法比较多。笔者利用二值链码技术,计算图像的区域属性,这些属性包括测量指定图像区域的面积、重心和周长等参数,如表4所示。图6为红外探伤缺陷长径大小,在实际传导过程中由于三维热扩散的影响,测得的缺陷尺寸比缺陷的实际尺寸要大一些。

## 4 结论

针对玻璃纤维分层缺陷,对其进行了红外热波无损检测,深入分析了整个试验过程以及处理方法。

(上接第879页)

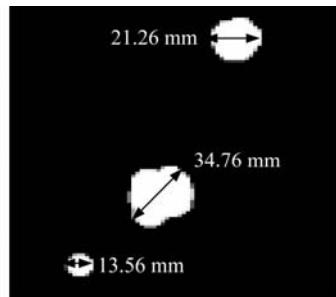


图6 缺陷长径大小

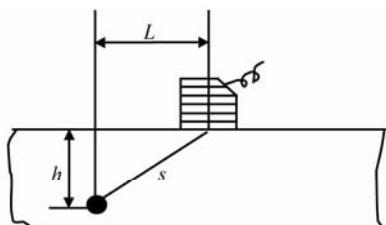


图4 缺陷位置计算的基本原理

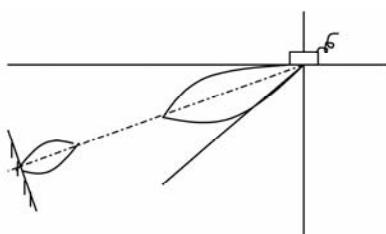


图5 探头主波束中心轴与缺陷走向垂直时回波最高功能根据回波最高位置对缺陷投影距离和深度进行相应的修正。

## 4 结论

对管材焊缝从外圆周向横波检测时缺陷定位的

结果表明:此技术能够快速、高效、直观地检测出试件的分层缺陷,并能对缺陷的尺寸、深度等进行较为准确的定量识别,取得了较好的效果;同时为后期对发动机壳体、喷管进行红外热波检测奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 耿荣生.飞机复合材料粘结质量评价的新方法研究[J].无损检测,2001,23(11):461—464.
- [2] 杨正伟,张炜,田干,等.导弹发动机的热波无损检测[J].无损检测,2009,31(1):7—9.
- [3] 李艳红,张存林,金万平,等.碳纤维复合材料的红外热波无损检测[J].激光与红外,2005(4):262—264.
- [4] 蒋淑芳,郭兴旺,沈京玲,等.固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热波无损检测[J].激光与红外,2005,8(8):584—586.

方法、缺陷位置参数与检测参数之间的关系,对定位操作过程中使用的仪器、人工反射体形态等对定位的影响等进行了分析,得出以下结论:

(1) 对管材焊缝,当进行外圆周向检测时,缺陷定位准确性不仅与定位方法有关,还与工件外径、探头K值有关。不同方法,缺陷定位的修正不同。

(2) 利用数字型超声探伤仪检测时,不能过分依赖仪器显示的数据确定工件中缺陷的位置,应结合缺陷的形态进行。

这里还需注意,管材焊缝检测时,经常还会用到二次波,对薄壁焊管,有时甚至用到三次波、四次波,这时由于声束的发散和波形畸变,缺陷定位误差会增大,这里没有针对此类问题讨论。

## 参考文献:

- [1] 姚志忠.圆柱曲面周向横波探伤缺陷定位通用曲线[J].无损探伤,2004,28(3):11—18.
- [2] 庄文栋.超厚曲面焊缝超声探伤定位精度的影响因素[J].无损检测,1994,16(4):245—246.
- [3] 张丙法,关洪光.倾斜平面对焊缝超声探伤结果的影响[J].无损检测,1999,21(5):203—205.
- [4] API SPEC 5L—2005 Specification for Line Pipe[S].