

爬波检测技术的应用

张国丰, 严 智, 袁光华, 周路生

(国核电站运行服务技术公司, 上海 200233)

摘 要:对奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝表面及近表面缺陷进行爬波检测时, 缺陷的定位和定量(测长、测高)是爬波检测的难点。介绍了爬波检测技术的原理、爬波探头和试块。结合大量的试验数据, 总结了爬波检测技术应用的具体方法。包括检测系统的标定、灵敏度的设定、缺陷定位以及缺陷定量的详细方法。通过对检测技术的验证, 充分证明了爬波检测技术在奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝表面及近表面缺陷检测应用中的可靠性。

关键词:爬波; 奥氏体不锈钢焊缝; 异种金属焊缝; 端点信号

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)01-0028-04

Application of Creep Wave Inspection Technology

ZHANG Guo-Feng, YAN Zhi, YUAN Guang-Hua, ZHOU Lu-Sheng

(State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: The defect quantification and location is a problem during the creep wave inspection technology applying on the surface and subsurface of austenitic stainless steel weld and dissimilar metal weld. This paper introduces the theory of creep wave inspection, creep wave probes and blocks of several researching projects. And this paper summarizes the detail method of applying the creep wave inspection technology with integrating with much experimental data. The applying methods include adjusting inspection system, sensitivity setting, defect locating and sizing. The reliability of creep wave inspection technology applying on the surface and subsurface of austenitic stainless steel weld and dissimilar metal weld was testified with validating the technology.

Keywords: Creep wave; Austenitic stainless steel weld; Dissimilar metal weld; Tip echo

随着现代工程材料的发展, 奥氏体不锈钢材料被广泛地应用到核电领域, 奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝也越来越广泛地出现在容器设备和管道中。这些焊缝在焊接过程中, 容易在焊缝表面和近表面产生裂纹类缺陷, 这类缺陷用常规的无损检测方法检测, 很容易漏检, 甚至不能检出。而超声爬波检测技术对这类缺陷有很好的检测效果。

奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝表面及近表面缺陷爬波检测时, 如何对缺陷进行定位和定量(测长、测高)是爬波检测的技术难点, 而且其检测能力如何, 国内外也鲜有资料介绍。笔者结合爬波检测

技术的研究, 介绍了爬波检测技术在上述缺陷检测中的应用。

1 爬波检测技术

1.1 爬波检测原理^[1]

爬波是探头入射角接近第一临界角时折射纵波与横波合成的特殊波型, 它的传播速度变化范围为 $0.8 \sim 0.9 c$ (c 为纵波声速)。爬波衰减的主要原因是爬波在沿表面下传播过程中不断产生横波, 导致传播过程中波幅逐渐衰减, 因此爬波的传播距离由波型转换的程度和在固体中横波能量的损失程度而定。由于能量的急剧衰减, 通常短焦点爬波探头的敏感点(即焦点)位于探头的前沿, 长焦点爬波探头名义焦点距离可以达到 20 mm, 通常最大有效声程可以达到 45 mm。

收稿日期: 2009-02-16

作者简介: 张国丰(1982—), 男, 助理工程师, 主要研究超声和涡流检测。

超声爬波检测技术由于采用大入射角楔块,声波进入工件后可产生多种波形,包括纵向表面爬波、体积内纵波和两种类型的横波(图1)。工件内部的 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 横波在工件的底部产生波型转换产生纵波和爬波。由于一次爬波的角度在 $75^{\circ}\sim 83^{\circ}$ 之间,几乎垂直于被检工件的厚度方向,与工件中垂直方向的裂纹接近成 90° ,因此对于垂直性裂纹有较好的检测灵敏度。同时爬波检测对工件表面的粗糙度要求不高,所以爬波检测技术被广泛运用于内外表面、近表面的裂纹检测。

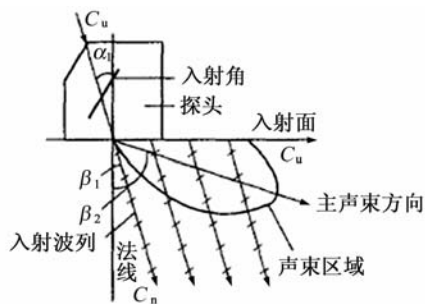


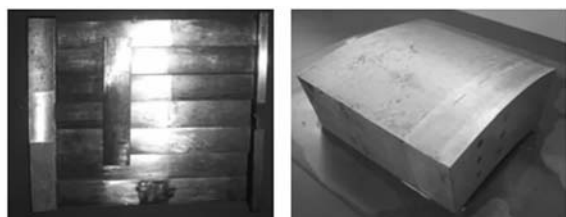
图1 爬波原理简图

1.2 爬波检测探头

超声爬波探头的类型有单晶爬波探头、双晶并列式爬波探头和双晶串列式爬波探头等^[2]。针对奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝的特点,此类焊缝的表面及近表面缺陷检测主要采用双晶并列式爬波探头(以下简称双晶爬波探头)。如RTD公司的TRCr4-St2(6×25),TRCr2-St2(6×13)以及国核电站运行服务技术公司研制的2×6×13 TRCr2F15等。

1.3 爬波检测对比试块及参考反射体

针对奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝的爬波检测,设计加工了相应的爬波对比试块(图2)。在这些试块中分别布置了电火花槽、近表面横孔和平底孔等参考反射体。



(a) 槽型参考反射体 (b) 孔型参考反射体

图2 爬波对比试块

(1) 电火花槽 为了模拟焊缝表面的开口裂纹,依据相关的标准规范设计加工了长度分别为3,

6和9 mm;深度分别为1,2和3 mm及宽度为1.5 mm左右的电火花槽。为了模拟厚壁焊缝中深度较大的表面开口裂纹,设计加工了宽为0.5 mm,长为25 mm,深度分别为3,6和9 mm的电火花槽。为了验证爬波的检测能力,设计加工了长度为6 mm、反射体上边沿距离焊缝外表面为2 mm,反射体高度分别为1和2 mm的埋藏性电火花槽。

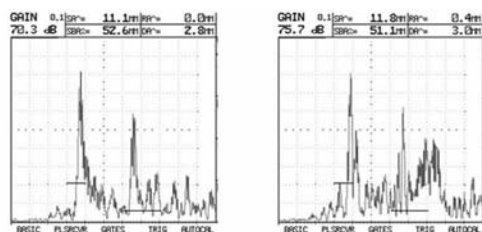
(2) 横孔 为了设定爬波检测时参考灵敏度,设计加工了距离焊缝外表面2 mm的 $\phi 1.6$ mm横孔;另外针对异种金属焊缝较易产生缺陷的区域,在厚壁异种金属焊缝试块的碳钢和预堆边以及预堆边与焊缝熔合线上加工了距表面3和9 mm的 $\phi 2$ mm横孔,来模拟焊缝近表面的缺陷。

(3) 平底孔 为了验证爬波检测近表面面积型缺陷的能力,以及调节爬波检测系统的线性,设计加工了 $\phi 2$ mm,孔中心距离焊缝外表面分别为2,4和6 mm的侧壁平底孔。

2 爬波检测技术的应用

2.1 检测系统的标定

由于双晶爬波探头的声场特性,在爬波探头有效声场范围内,声束角度并不是恒定的,所以很难在探头有效声场范围内调节检测系统的线性,只能在一定的范围内调节检测系统的线性。利用对比试块中的近表面的不同深度 $\phi 2$ mm平底孔,依据爬波的声学特性,反复调节检测仪器上的声速、探头零点以及探头的角度等参数,使得相应的平底孔对应的显示深度误差在 ± 0.5 mm范围之内,从而实现一定范围内(如0~10 mm)的深度1:1标定。图3为系统标定信号图。



(a) 标定信号1 (b) 标定信号2

图3 系统标定信号图

2.2 参考灵敏度的设定

检测系统的线性调节好后,在进行检测前应利用对比试块中的距离焊缝外表面2 mm的 $\phi 1.6$ mm横孔确定参考灵敏度。移动爬波探头,对准灵敏度标定试块上深2 mm的 $\phi 1.6$ mm横通孔,

找到横通孔的最大反射波,调节仪器的增益,使得上述横孔的信号达到满屏高度的 80%,作为系统的参考灵敏度。图 4 为参考灵敏度信号图。

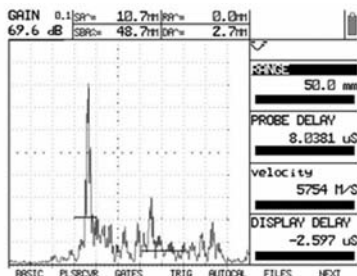


图 4 参考灵敏度信号图

2.3 缺陷检测

对比试块上焊缝表面和近表面的缺陷,爬波能得到高信噪比的信号,同时能保证足够的灵敏度余量,满足了相关标准的要求。爬波检测对比试块上的人工缺陷检测的结果如下:

- (1) 信噪比 在探头的有效覆盖深度范围均 >12 dB。
- (2) 系统灵敏度余量 在探头的有效覆盖深度范围均 <30 dB。
- (3) 平面性缺陷检出能力 爬波可检测 $\phi 2$ mm 平底孔及以上平面性缺陷。
- (4) 近表面检验盲区 <0.5 mm。

2.4 缺陷的定位

(1) 深度 利用标定好的系统,在相应灵敏度的基础上进行爬波检测。发现缺陷后,移动探头位置,使缺陷反射波在屏幕上显示为最大,此时仪器的显示深度即为缺陷的深度。

(2) 位置 短焦点的爬波探头检测缺陷时,缺陷位于探头前沿处;长焦点的爬波探头检测缺陷时,缺陷的位置可利用仪器上的相关读数确定(如 USN60 仪器的 RA 值)。依据试验数据,爬波检测缺陷定位误差能保证在 ± 0.5 mm 范围内。

2.5 缺陷的定量

2.5.1 缺陷测长

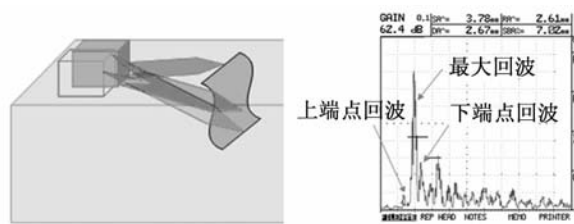
采用 -6 dB 法测量缺陷的长度,缺陷测长的误差在 ± 0.5 mm 范围内。

2.5.2 缺陷测高

(1) 测高方法

缺陷高度的测量可利用缺陷信号的上下端点信号进行测定,即端点回波法。爬波缺陷测高原理见图 5。

端点回波法测量缺陷高度的具体方法是:① 在



(a) 示意图

(b) 波形图

图 5 爬波探头缺陷高度测量方法

缺陷最大回波处,适当提高检测灵敏度。② 前后移动探头,根据动态波形,寻找伴随缺陷主峰前后一起出现的小峰,或者寻找主峰降低甚至消失时伴随产生的小峰。位于主峰前的伴随的小峰为缺陷的上端点的回波,位于主峰后的伴随小峰为缺陷的下端点回波。③ 移动探头,找到缺陷的下端点最高回波,记录下端点的深度;用同样的方法,测量缺陷上端点的深度,上下端点的深度差即为缺陷的高度。

如果缺陷高度 <2 mm,缺陷的上下端点回波将湮没在缺陷回波之中,故无法测量其高度。换言之,如果无法找到上下端回波,说明缺陷的自身高度 <2 mm。

(2) 对比试块中的人工反射体测高

采用爬波测高技术测量各参考反射体高度结果见表 1。

表 1 对比试块人工反射体的爬波法测高结果

| 反射体说明 | 反射体 | 自身高度/mm | 爬波检测结果/mm | 备注 |
|-----------|-----|---------|-----------|----------------------|
| 表面开口人工反射体 | 1 | 1 | 无法测高 | 误差在 ± 0.5 mm 范围内 |
| | 2 | 2 | 1.7~2.24 | |
| | 3 | 3 | 2.62~2.95 | |
| | 4 | 6 | 6.02~6.28 | |
| | 5 | 9 | 8.51~9.01 | |
| 埋藏性模拟裂纹 | 6 | 2 | 2.7 | 与射线检测结果一致 |
| | 7 | 3 | 3.9 | |

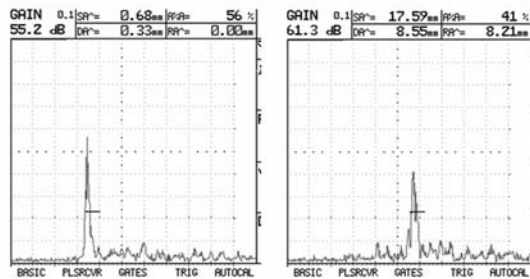
2.5.3 表面开口缺陷的判定

采用爬波探头从工件表面检测,显示信号没有上端点信号或者测深结果表明其深度 <2 mm,则该显示可认为是表面开口裂纹。

2.5.4 缺陷测高时需注意的问题

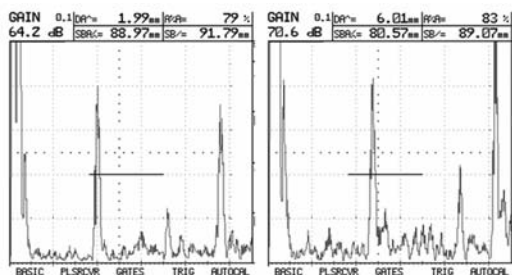
(1) 爬波检测较深的开口缺陷(槽)时,测高时的下端点信号不是紧随着缺陷最大回波信号,而是在缺陷最大回波信号降落到一定程度甚至消失的情况下,出现的有明显缺陷特征的信号为缺陷的下端

点信号。此时,移动探头使得该信号达到最高,从仪器上读得显示深度即为该缺陷的高度。图 6 即为爬波检测 9 mm 矩形槽时的信号图。



(a) 信号 1 (b) 信号 2
图 6 爬波检测 9 mm 深槽时测高信号图

(2) 爬波检测面积型缺陷(平底孔)时,测高时上下端点信号可能就是“双峰”信号。探头在缺陷位置前后移动,可以明显地发现“双峰”信号,“双峰”信号达最高时的显示深度分别为平底孔的上下端点深度。图 7 为爬波检测 $\phi 4$ mm 平底孔测高信号图。



(a) 信号 1 (b) 信号 2
图 7 爬波检测 $\phi 4$ mm 平底孔测高信号图

3 爬波检测技术验证

笔者对爬波检测技术进行了验证,获得测量的自然裂纹高度与解剖结果(表 2)。验证流程见图 8。

表 2 爬波测量自然裂纹高度与解剖结果对比表

| 试块 编号 | UT 结果 | | | | | 解剖结果 | | | | 结论 |
|----------|-------|----------|---------------|----------|---------|------|------------|-------|-------|-----|
| | 序号 | 方位 | 深度/mm | 高度或长度/mm | 当量/dB | 序号 | 方位 | 深度/mm | 高度/mm | |
| 1 | 1 | 0°—12 mm | 1.97/3.0 | 单个<1.5 | DAC-2.5 | 1 | 0°—12.2 mm | 3.5 | 点 | 吻合 |
| | 2 | 0°—12 mm | 7.91 | <1.5 | DAC-1.7 | 2 | 0°—14.7 mm | 7.5 | 1.1 | 吻合 |
| 2 | 1 | 0°+5 mm | 1.83 | <1.5 | DAC-2 | 1 | 0°+4.9 mm | 2.0 | 1.0 | 吻合 |
| | 2 | 0°+6 mm | 6.49 | <1.5 | DAC-0.5 | 2 | — | — | — | 不吻合 |
| 3 | 1 | 0°+15 mm | 2.02 | 1.64 | DAC-1.9 | 1 | 0°+16 mm | 2.0 | 1.8 | 吻合 |
| | 2 | 0°+17 mm | 3.39 | <1.5 | DAC+0.6 | | | | | |
| 4 | 1 | 0°+45 mm | 3.65/4.6/5.87 | 单个<1.5 | DAC+5.3 | 1 | 0°+45.1 mm | 7 | 点 | 吻合 |
| | | | | | | 2 | 0°+44.6 mm | 3 | 1.5 | |

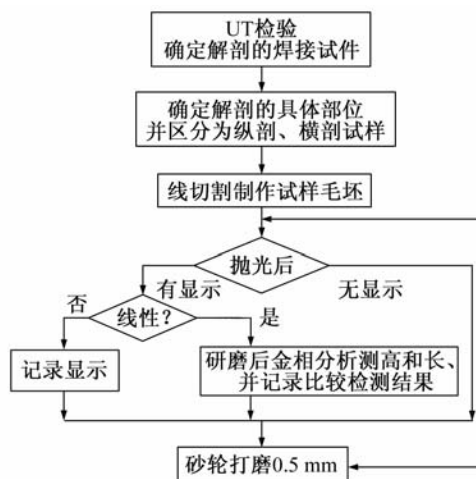


图 8 验证流程图

验证结果表明,对于自身高度 >0.5 mm 的缺陷,爬波检测技术的检验结果准确率达到 97%。结合实际的爬波应用经验,爬波探头能有效检测出焊缝中自身高度 >0.5 mm 的缺陷;对自身高度 >2 mm 的缺陷,爬波检测技术能准确定位缺陷,测量缺陷的长度和高度。

图 9 为表 2 中编号为 2 的试块缺陷渗透检测照片,金相照片及超声检测波形。

4 结语

超声爬波检测技术解决了奥氏体不锈钢焊缝和异种金属焊缝表面及近表面缺陷检测的难题。当然爬波检测技术还有待进一步深入研究,特别是实际的技术应用还需要更多的实践,才能使得爬波检测技术更加完善,更加成熟,以便更好地应用。

致谢:感谢金德荣先生制作的爬波探头。同时感谢梅德松先生和钟志民先生对本文提出的宝贵意见。

(下转第 35 页)

表 1 三种材料的试验数据¹⁾

| 材料 | 直径/mm | $t_1/\mu\text{s}$ | $t_2/\mu\text{s}$ | $t_3/\mu\text{s}$ | $t_4/\mu\text{s}$ | $t_5/\mu\text{s}$ | $t_6/\mu\text{s}$ | $t_7/\mu\text{s}$ | $t_9/\mu\text{s}$ | $t_{11}/\mu\text{s}$ |
|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 玻璃棒 1 | 80.18 | 27.32 | 35.44 | — | 43.62 | 55.48 | — | 58.99 | 70.72 | 76.82 |
| 玻璃棒 2 | 60.28 | 20.01 | 25.91 | — | 32.74 | 39.83 | 41.23 | 45.32 | — | 60.23 |
| 钢棒 | 60.44 | 18.82 | 24.12 | — | 32.09 | 40.01 | 38.30 | — | — | 57.76 |
| 铝棒 | 90.20 | 28.33 | 36.82 | 42.50 | 49.56 | 66.92 | 55.93 | — | 73.16 | 95.57 |

注:1)表中“—”为不能准确测出过零点。

表 2 弹性模量计算

| 材料 | 直径/mm | $c_L/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $c_T/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $c_R/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\tau/\mu\text{s}$ | $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $G/\times 10^{10}(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | $E/\times 10^{10}(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ |
|-------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--|--|--|
| 玻璃棒 1 | 80.18 | 5 905 | 3 531 | 3 286 | 0.16 | 2.423 | 3.021 | 7.381 |
| 玻璃棒 2 | 60.28 | 5 681 | 3 366 | 3 082 | -1.21 | 2.423 | 2.745 | 6.751 |
| 钢棒 | 60.44 | 6 205 | 3 384 | 3 250 | -0.66 | 7.905 | 9.052 | 23.33 |
| 铝棒 | 90.20 | 6 406 | 3 225 | 2 965 | 0.84 | 2.800 | 2.912 | 7.748 |

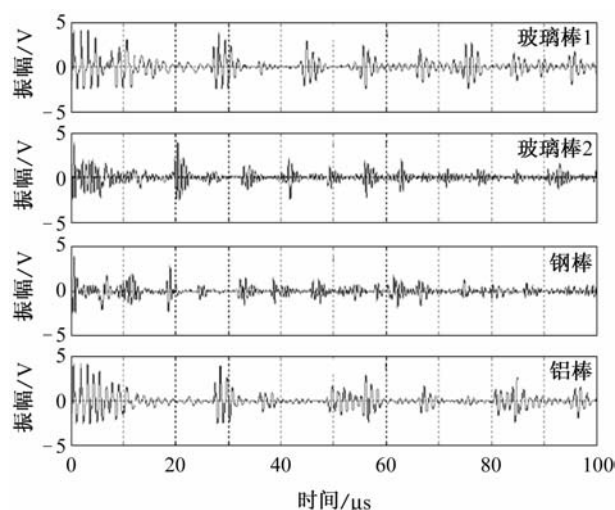


图 6 试验测得信号

和动态光弹试验相配合的研究,建立了用于识别单个纵波传感器正入射接收信号典型波包的公式。在确定典型波包在信号中的时刻标度后,即可计算出棒材中的纵波速度、横波速度以及瑞利波速度。因为公式的个数多于未知数个数,此方法对测量值也有修正的作用。可见,使用单个纵波探头即可完成对棒材力学性能比较全面的评价。

参考文献:

- [1] 原可义. 超声散射 CT 声成像方法研究[D]. 北京:清华大学,2008.

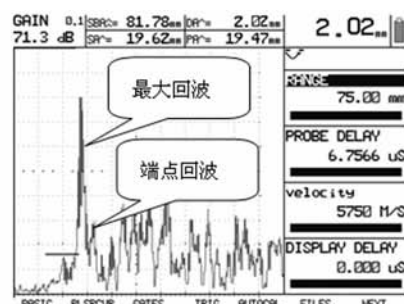
(上接第 31 页)



(a) 渗透检测照片



(b) 金相照片



(c) 超声检测波形

图 9 2 号试块缺陷的验证

参考文献:

- [1] 樊利国,荆洪阳. 爬波检测及其应用[J]. 无损检测,

2005,27(4):213—214.

- [2] 廉德良,魏天阳. 薄壁管材探伤用爬波探头的设计及应用[J]. 无损检测,2004,26(7):353.