

P91/P92 钢管道对接焊缝微裂纹的超声波检测

陈君平, 杨文峰, 韩 腾, 宁继强, 齐晓平, 刘建屏, 季昌国
(华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 随着 P91/P92 钢在国内火力发电机组的大量应用, 对其焊接缺陷的检测也成为质量监督的重点工作。目前, 在运行检修过程中, 超声波检测出的缺陷主要为以微小裂纹类缺陷为主的层间缺陷。通过对某厂 P91 钢主蒸汽管道对接焊缝的超声波检测, 对微小裂纹的缺陷回波波形特征进行了分析, 对该类缺陷在超声波检测中的判断和识别方法进行了探讨和总结。

关键词: 微小裂纹; 层间缺陷; 缺陷回波; 波形特征; 超声波检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2016)08-0044-03

The Ultrasonic Testing of Micro-crack in P91/92 Steel Pipe Butt Weld

CHEN Jun-ping, YANG Wen-feng, HAN Teng, NING Ji-qiang, QI Xiao-ping, LIU Jian-ping, JI Chang-guo
(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Due to the large number application of P91/P92 steel of thermal power generating units in domestic, weld defects detection problem also gradually became the focus of quality supervision work. In the process of operation maintenance, the defects detected by Ultrasonic inspection were mainly micro-cracks in the interlayer. In this paper, by means of ultrasonic inspection on the P91 steel butt weld of main steam pipe in a factory, the waveform character of micro-cracks was analyzed, and the way how to judge and identify the defects in ultrasonic testing was studied and discussed.

Key words: Micro-crack; Interlayer defects; Defect echo; Waveform character; Ultrasonic testing

P91/P92 钢属于改良型 9Cr-1Mo 高强度马氏体耐热钢, 具有较高的抗氧化性能和抗高温腐蚀性能、良好的冲击韧性、高而稳定的持久及热强性能, 优良的导热系数和较小的膨胀系数。其在使用温度低于 620 ℃ 时的许用应力高于奥氏体不锈钢。自 1996 年开始, 国产 300,600 MW 及以上亚临界和超临界机组开始大量采用 P91 钢作为主蒸汽、高温再热蒸汽管道及末级集箱的用材。2006 年后, 随着国内超超临界机组的相继投产, P92 钢开始大量应用于超超临界机组的主蒸汽、高温再热蒸汽管道及末级集箱制造^[1]。目前, 在对电力系统已安装机组的运行检修过程中, 发现超声波检测出的缺陷主要以冷裂纹、热裂纹、未熔及细小夹渣等为主, 尤其以微

小裂纹类缺陷为主的层间缺陷为多^[2-3]。因此, 采用合理有效的超声波检测方法来保证该类缺陷的检出率, 无疑是电站锅炉安全运行的重要保障手段。笔者通过对某电厂的 P91 钢主汽管道的检验, 对该类缺陷的超声波检测方法进行了分析和探讨。

1 P91/P92 钢横波声速测定

高强度新型耐热钢的共同特点之一是其合金元素含量大幅增加, 导致材料声速也发生变化, 近年来引起了无损检测工作者的关注^[4-7]。使用数字超声波检测仪检测时, 声速是影响检测定位定性的重要因素。只有准确测定被检材料的横波声速, 才能对缺陷的深度、位置进行精确地测量。

因此, 在检测前, 为了减小检测过程中的定位、定量误差, 选用专用的 P91 钢的半圆试块、CSK I A 和 CSK III A 试块进行仪器参数的调节。为了得到更为精确的声速, 笔者利用数字式超声波检测仪在

收稿日期: 2015-12-10

作者简介: 陈君平(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电站锅炉压力容器检验及金属监督工作。

通信作者: 陈君平, E-mail: realsnow@163.com。

P91 钢的半圆试块上进行声速的测定, 测定时预先设定近似声速, 以此声速在半圆试块上测定两次底面反射声程差为:

$$\Delta S = S_n - S_{n-1} \quad (1)$$

式中: S_n, S_{n-1} 分别为试块第 $n, n-1$ 次底面反射声程。

将 ΔS 代入以下公式进行计算得:

$$c = \frac{d}{\Delta S} c' \quad (2)$$

式中: d 为试块在钢中声程; c' 为预先输入仪器的近似声速值。

2 检验过程及结果

在某电厂的 1# 机组检修过程中, 对锅炉和汽机侧主蒸汽管道对接焊缝分别进行了超声波检测, 采用的检测标准为 JB/T 4730.3—2005《承压设备无损检测 第 3 部分: 超声检测》, 检测等级为 B 级。主汽管道的规格为 $\phi 453 \text{ mm} \times 41 \text{ mm}, \phi 337 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$; 材料为 SA335-P91 钢。采用的检测仪为汉威 HS 611e 数字式检测仪, 探头型号为 2.5P13×13K1、K2。按上述声速测定方法对横波声速进行测定, 并将测试值输入仪器中, 然后在同材料试块上对仪器进行调节。

检测发现焊缝 7 道主蒸汽管道焊口内部存在多处记录性缺陷, 缺陷当量幅值为定量线上下, 多数缺陷测长为点状缺陷, 且有一定的方向性, 并且有些缺陷的再现性较差, 从焊缝两侧检测时无法对应。检测出的缺陷深度、最高波幅当量大小、最大缺陷测长及焊缝缺陷数量等如表 1 所示。表中 SL 为定量线。

表 1 某机组主蒸汽管道对接焊缝中检出的缺陷信息

焊口 编号	缺陷深度/ mm	最高波幅/ dB	缺陷长度/ mm	缺陷数量/ 个
1#	13~32	SL+5	点状	31
2#	10~23	SL-1	点状	17
3#	13~23	SL+3	点状	22
4#	7~22	SL+7	点状	14
5#	8~30	SL+3	10	24
6#	12~33	SL+4	断续 60	38
7#	12~32	SL+5	20	34

通过对上述管道对接焊缝的检测发现, 这些缺陷在焊缝中普遍存在, 检测过程中一般反射波高不

高(在评定线上下); 按目前标准检测时, 如果不特别地确定缺陷性质, 则一般对其按点状缺陷判定, 均符合标准要求。但是, P91/P92 钢在国内电力机组的安装中, 焊接工艺要求极为严格, 通常在焊接过程中不会出现如此多的缺陷。通过对其中缺陷显示较为严重的焊口进行解剖, 发现该类缺陷性质为微小裂纹类缺陷, 缺陷长度为 3~5 mm, 典型缺陷示例照片如图 1 所示。



图 1 微裂纹典型缺陷解剖示例照片

3 分析和讨论

3.1 P91/P92 钢声速的测定方法

在对 P91/P92 钢进行超声波检测前, 应选用同材料的试块调节检测参数, 尽量不使用普通碳钢材料。若受条件限制, 不得已采用普通材料的试块调试时, 应根据声速差异在计算后进行修正。

如前所述, 和普通碳钢相比, P91/92 钢中的声速变化较大, 那么只有准确测定材料的横波声速, 才能对缺陷的深度、位置进行精确地测量。超声波检测仪不是为了测量材料声速而开发的, 因此用超声波仪器采用通过法测定的材料声速不一定就是材料的精确声速。数字式检测仪所显示的反射波位置, 实际是通过测定从晶片开始发射超声波到声波返回至晶片的时间。这个时间既包括了声波在探头内及耦合剂中的纵波传播时间, 也包括了在钢中的横波传播时间。因此, 采用前文所述的声速测定方法, 即通过测量半圆试块上产生的多次反射波声程差并进

行相关计算后所得到的横波声速精度较高,在实际检测工作中也易于操作。

3.2 缺陷波形特征分析

检验过程中发现的微裂纹缺陷,普遍反射回波当量较低;对缺陷进行解剖后发现裂纹长度多在3~5 mm之间,缺陷自身高度较小。为了便于观察微裂纹的波形特征,选取当量较高的一处缺陷进行分析。选取了表1所示的7#焊口中某缺陷的回波波形以及前后包络图形,如图2所示。

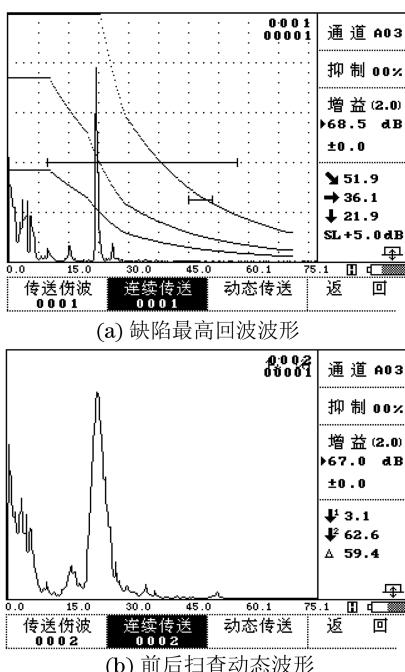


图2 典型缺陷的最高回波波形及动态波形

对图2所示的缺陷最高回波波形和前后扫查动态波形进行分析,可以看出:该类缺陷的回波为一尖锐的锯齿状回波。当探头进行前后、左右扫查时,反射波包络线范围很小,较为尖锐,根部干净,探头与焊缝成一定的角度,具有裂纹的特征^[8];左右转动探头时,反射波幅度变化较快,会看到锯齿状的波峰交错变化。

3.3 微裂纹缺陷检测特点

通过大量的调研及焊缝解剖结果发现,由于P91/P92钢合金含量高,结晶温度区间范围变大,产生结晶裂纹的几率也变大;其焊缝中微小裂纹产生的原因主要是焊接过程中焊条收弧时产生的弧坑裂纹缺陷。裂纹是焊接结构中危害最大的缺陷,即使是层间弧坑小裂纹,在高温高压管道运行过程中也会不断扩展延伸,直至焊缝发生断裂。超声检测时,细小的、方向不确定的弧坑裂纹很容易造成漏检。超声波检测P91/P92钢焊缝中微裂纹一般有如

以下几个特征:

(1) 当在焊缝一定厚度范围内存在多个缺陷反射回波时,探头移动过程中,缺陷反射波此起彼伏。

(2) 缺陷的反射回波波幅较低,个别反射回波在Ⅱ区或者Ⅲ区以上,多数缺陷反射波在Ⅰ区;很多缺陷反射波与焊缝存在一定夹角,探头转动一定角度后,反射波出现,探头稍一转动,缺陷波即刻消失。

(3) 对单个缺陷从焊缝两侧进行检测时,无法对应,反射波多出现在探头本侧。

(4) 如果出现个别波幅较大、长度较长的缺陷回波,要特别引起重视,这很可能是个别微小裂纹扩展的结果。

3.4 缺陷判定原则

通过对缺陷特征的分析可以发现,由于缺陷本身尺寸较小,在检测过程中对于一些尺寸接近3倍波长的缺陷,其缺陷波可类似看成球形分布,不论是垂直入射还是倾斜入射,都能得到一定幅度的缺陷反射回波^[9]。实际解剖也表明,此类缺陷的尺寸大小有时与反射波波幅无线性关系。对于P91/92焊缝微裂纹的超声波检测,不能简单地按反射波幅来判定,除了应对定量线(SL)和判废线(RL)之间的反射波幅进行分析外,对于低于定量线(SL)的缺陷波形特征也应进行分析和判定^[10]。

因此,对于此类性质缺陷的超声波检测,应在常规缺陷检测标准规定的检测灵敏度的基础上再提高6 dB作为检测灵敏度。也就是说,对于缺陷当量波幅超过SL-6 dB的反射回波,应根据探头位置、方向、反射波的位置、波形的变化及焊接接头的具体情况进行分析,判断其是否具有微小裂纹的特性。

值得注意的是,该判定原则是基于P91/92钢的材料特点、焊接工艺及产生缺陷的性质等进行的综合判定,不具有普遍性,因此不能将该判别方法直接应用到其他材料上去。此外,由于该方法能大致检测出P91/92钢内部小裂纹,因此其是对焊接接头的一个整体评价,而不仅仅是对单一缺陷的评定。

4 结论

(1) 由于P91/P92钢中合金元素含量大幅增加,其声学特性发生了很大变化,对超声波检测焊缝缺陷时的定位及定性造成了影响,故在实际检测中应对材料横波声速加以测定。

(下转第50页)

此时,声束扫查的重叠率为 60%,满足检测要求。

4 检测应用

在通过模型确定的检测工艺参数条件下,对 $\phi 9 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 的 Zr-4 合金人工缺陷样管进行了 100 次的重复检测,分别计算出各通道对人工缺陷检测幅度的标准偏差,如表 1 所示。

由检测结果可看出,采用优化后的检测工艺参数,检测系统的稳定性明显增强,各检测通道对人工缺陷的 100 次重复检测的标准偏差不足 0.5 dB,远优于 1 dB 的检测要求;而各通道对同一人工缺陷 100 次重复检测的最大波动为 1.78 dB,优于波动值为 2 dB 的检测指标要求。

表 1 参数优化后各检测通道重复 100 次检测的

标准偏差 dB							
纵伤通道 1		纵伤通道 2		横伤通道 1		横伤通道 2	
内纵	外纵	内纵	外纵	内横	外横	内横	外横
0.37	0.42	0.38	0.45	0.38	0.29	0.35	0.37

将优化后的检测工艺参数应用于批量检验,已完成了上万支核用锆合金管材的超声检测工作。现场检测结果表明,采用优化后的工艺参数,检测效率高,结果稳定可靠,效果良好。

5 结论

(1) 选取三层 RBF 网络建立核用锆合金管材超

声参数与优化模型。其中输入层为探头转速、仪器重复频率(送进速度为 $7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时),输出层为各检测通道的稳定性(标准偏差)。

(2) 构建的网络为 2-8-1,网络运算的 M_{SE} 误差为 0.004,表明模型具有精度高、偏差小的特点。

(3) 通过检测参数优化模型,确定出 $\phi 9 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 的核用 Zr-4 管材超声检测的最佳参数为管材送进速度为 $7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,探头旋转速度为 5 100 rpm,仪器重复频率 15 kHz。

(4) 应用结果表明,所建立的锆合金管材超声检测参数优化模型,适应于小径薄壁管超声检测的参数优化,可以较好地指导现场实际生产。

参考文献:

- [1] 刘建章.核结构材料[M].北京:化学工业出版社,2007:5-7.
- [2] 董浩存,赵田,宛家旗,等.金属管材超声横波探伤入射角的研究[J].无损探伤,2014,38(6): 21-24.
- [3] 马小怀,江立新,王海良.探头旋转式管材超声自动检测系统的研制[C]//全球华人无损检测高峰论坛论文集.厦门:[出版者不详],2011:21-25.
- [4] 李国勇.神经模糊控制理论及应用[M].北京:电子工业出版社,2009: 18-67.
- [5] 李恒羽,袁改焕,王德华.核用锆合金管材的超声波检测[J].无损检测,2008, 30(4):62-64.
- [6] 无损检测编委会.无损检测 II 级培训教材[M].北京:机械工业出版社,2005:170-179 .

(上接第 46 页)

(2) 对于 P91/P92 钢对接焊缝中的微裂纹类性质的缺陷,应在常规检测过程中提高 6 dB 的检测灵敏度,对缺陷当量波幅超过 SL-6 dB 的反射回波,应根据探头位置、方向、反射波的位置、波形的变化及焊接接头的具体情况,进行综合分析和判断。

参考文献:

- [1] 电力规划设计总院管道专业技术小组.关于我国火电厂主蒸汽管道采用 P91 钢的建议[J].中国电力,1996,29(7):3-9.
- [2] 梁军.加强金属材料技术监督研究 确保超(超)临界机组可靠运行[C]//(超)临界锅炉用钢及焊接技术协作网第三届论坛大会论文集.天津:[出版者不详],2009.
- [3] 严正,龙华明,李振山.超声波检测 P92 钢焊接接头的几个特殊问题[J].焊接技术,2009,38(1):50-52.
- [4] 牛晓光,焦荣格,李海生,等.T91 钢小径管焊缝超声波探伤缺陷的定位[J].华北电力技术,2006(7):8-10.
- [5] 宿修平,苏德瑞.P91 钢焊缝缺陷检测及原因探讨[J].华北电力技术,2006(7):44-47.
- [6] 黄文大,金南辉.电站锅炉 SA335-P91 钢焊接接头的超声波检测[J].无损检测,2007,29(10):62-63.
- [7] 李振山,严正,柳传志,等.P91/P92 钢管道焊接接头的无损检验[J].电力建设,2010,31(8):94-100.
- [8] 王志永,李树军,郝晓军,等.P91 钢管对接焊缝层间裂纹的超声波检测[J].无损检测,2011,33(5):55-57.
- [9] 郑晖,林树青.超声检测[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2008.
- [10] 杨美媛,郭建新.P92 钢焊接接头超声波检测缺陷的分析[J].无损检测,2013,35(3):15-18.