

重水堆压力管超声检查数据偏差分析

商俊敏, 邹廉列, 周 懿

(中核核电运行管理有限公司, 海盐 314300)

摘 要:对核电站压力管前后两次在役检查缺陷数据变化的原因进行了分析, 认为缺陷表面不平整和检查系统误差是影响检查精度的主要因素, 两者共同作用使检查数据服从正态分布规律。经过分析, 得到缺陷并未明显扩展的结论。

关键词:重水堆; 压力管; 超声检查; 数据偏差分析

中图分类号: TG115. 28; TL48

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)03-0074-03

Analysis of Ultrasonic Inspection Data Error of Heavy Water Reactor Pressure Tube

SHANG Jun-Min, ZOU Lian-Lie, ZHOU Yi

(CNNC Nuclear Power Operations Management Co Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: After analyzing the reasons for the change of defect datum from in-service inspections of the nuclear power plant pressure pipe, it was concluded that surface roughness and the system error were the main factors of affecting inspection accuracy, both of them made the inspection datum comply with the normal distribution rule. After analysis, The conclusion that the flaw defects had not significantly extended was gotten.

Keywords: Heavy water reactor; Pressure tube; Ultrasonic inspection; Data error analysis

国内某核电厂有 2 个 CANDU6 型重水堆, 每个反应堆有 380 根水平布置的压力管, 核燃料在 380 根压力管中起链式反应。压力管是重水堆的主热传输系统的承压边界, 根据核安全法规的要求, 需要定期对压力管进行在役检查, 主要检查方式是超声波检查。

压力管超声检查系统共有 6 个超声检查探头, 探头布置见图 1, 各探头的参数与功能如下:

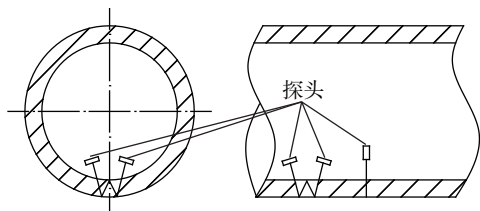


图 1 压力管超声检查探头布置图

(1) 2 个圆周方向布置的横波斜探头(10 MHz,

45°, 晶片直径 10 mm), 用于检查轴向缺陷, 即检查与检查面垂直或成一定角度的缺陷。

(2) 2 个轴向布置的横波斜探头(10 MHz, 45°, 晶片直径 10 mm), 用于检查圆周方向缺陷, 检查与检查面垂直或成一定角度的缺陷。

(3) 1 个低频纵波直探头(10 MHz, 晶片直径 6.35 mm), 主要用于检查与检查面平行的缺陷。

(4) 1 个高频纵波直探头(20 MHz, 晶片直径 6.35 mm), 主要用于检查与检查面平行的缺陷, 对缺陷进行复探和精确测量。

压力管运行过程中产生的主要缺陷是管壁磨损, 燃料棒束及冷却剂中的杂质与压力管之间的磨损导致压力管管壁产生凹坑或划痕, 管壁减薄会对压力管的应力强度和安全性产生影响, 为了对压力管的安全性进行评估, 需要准确地测量管壁减薄处的尺寸。

1 超声检查发现的两个问题

该核电厂某根压力管的 1# 缺陷(简称 1# 缺陷), 在 2005 年第 1 次检查和 2009 年第 2 次检查时

收稿日期: 2012-02-27

作者简介: 商俊敏(1979—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 现从事核电站在役检查工作。

测得的缺陷尺寸有所变化,分别为 $63\text{ mm} \times 1.6\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$ 和 $63\text{ mm} \times 1.1\text{ mm} \times 0.19\text{ mm}$ 。两次测量数据相比,缺陷长度方向没有变化,宽度方向减少了 0.5 mm ,深度方向增加了 0.04 mm 。

检查结束后,核电厂需要在短时间内对缺陷性质进行初步评估,给出是否需要缺陷进行处理,以及是否会影响反应堆及时重返临界的结论。

在评估该缺陷时,需要对以下两个问题进行详细分析,并做出合理解释:

(1) 经过 4 a 多时间的运行,为什么缺陷宽度反而减少了 0.5 mm ?

(2) 经过 4 a 多时间的运行,缺陷的深度增加了 0.04 mm ,该缺陷是否已明显扩展?

2 缺陷评估

以上两个问题的实质都是超声检查精度的问题。

2.1 第 1 个问题的分析

第 1 次检查,使用低频(10 MHz)纵波探头,采用 -6 dB 法确定缺陷宽度,检查精度是 $\pm 0.6\text{ mm}$,精度较低的原因是超声波的波束宽度值较大,大于或接近于压力管上一些小缺陷的宽度。

第 2 次检查,使用高频(20 MHz)纵波探头,采用 -6 dB 法确定缺陷宽度,检查精度是 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。第 2 次检查的检查精度要比第 1 次检查的检查精度大大提高,第 2 次检查的数据更接近与真实数据,所以造成了宽度测量值减少^[1]。

2.2 第 2 个问题的分析

第 1 次检查,采用高频纵波直探头 C 扫描,确定缺陷深度,该模式不是记录所有的 A 扫描数据,而是记录通过筛选闸门的信号并对其进行分析,对深度的检查精度是 $\pm 0.05\text{ mm}$ 。

第 2 次检查,采用高频纵波直探头 B 扫描,确定缺陷深度,B 扫描记录和分析所有的 A 扫描信号,对深度的检查精度提高到 $\pm 0.02\text{ mm}$ 。

另外,第 1 次检查时探头的扫描步距是 0.9 mm ,第 2 次检查时探头的扫描步距减小到 0.2 mm 。减少扫描步距,可以增加探头扫描的覆盖面,得到更多的数据,更有利于发现缺陷。

第 2 次检查时,在 1# 缺陷的 B 扫描信号图中,有两个明显的显示信号(见图 2),深度分别是 0.11 , 0.19 mm ,根据经验判断,该缺陷的实际深度接近 0.11 mm 的概率更大,所以,初步评估该缺陷没有扩展。但是,出于核安全保守决策,必须要采用

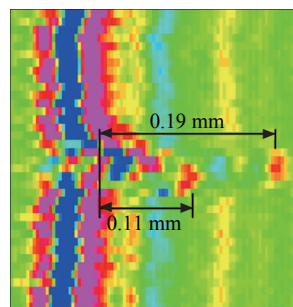


图 2 1# 缺陷超声检查信号图

0.19 mm 进行初步安全分析。检查结束后,利用复模技术(利用粘性材料贴在检查部件表面,获取检查部件表面模型的技术)对缺陷深度进行了准确的测量,测量的结果是 0.11 mm 。

3 数据偏差的原因

超声检查时,待检查部件表面往往是不平整的,超声波在部件内部传播路线也就存在不确定性。超声波在被检面的反射有以下几种情况:

(1) 当被检面垂直于超声波传播方向时,超声波经过一次反射,返回探头(如图 3(a)),此时测得的厚度是实际厚度。

(2) 当被检面是斜面,但是最深处的表面垂直于超声波传播方向,且超声波刚好经过最深处时,超声波经过一次反射,返回探头,见图 3(b),此时测得的厚度是实际厚度。

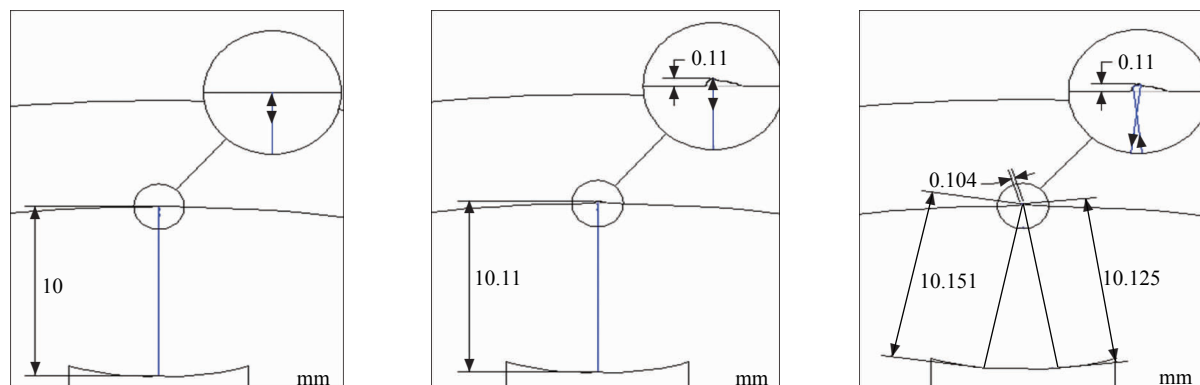
(3) 当被检面是斜面,超声波不能经过最深处表面,超声波会在缺陷底部经过数次反射,最后反射返回探头,见图 3(c),此时探头检查到的距离就不是缺陷的实际深度。

在实际检查过程中,缺陷部位被检表面大部分是不平整的界面,所以测量得到的深度值都具有一定的偏差,有些偏差还会比较大。

该核电厂压力管超声检查系统在检测 1# 缺陷深度时,如果超声波如图 3(b) 进行传播,则显示信号就是 0.11 mm ;如果超声波如图 3(c) 进行传播,则显示信号就是 0.19 mm ,具体计算如下:

$$\frac{10.151 + 10.125 + 0.104}{2} - 10.00 = 0.19\text{ mm}$$

由于检查对象表面不平整,超声检查系统本身也存在系统误差,所以利用一套超声检查系统对部件进行测厚时会存在一个误差范围,利用超声检查系统多次测量同一对象,测量数据一般符合正态分布规律,用标准偏差 σ 来表示检查系统的精度^[2]。



(a) 垂直入射到平整表面

(b) 缺陷最深处一次反射

(c) 缺陷处多次反射

图3 超声波入射不同表面时的缺陷检测情况

根据统计学原理,对于精度是 $\pm\sigma$ 的超声检查系统,测量某一部件的厚度时,测量数据落在 $\bar{x}\pm\sigma$ 范围内的概率是68.3%,测量数据落在 $\bar{x}\pm2\sigma$ 范围内的概率是95.4%, \bar{x} 和 σ 的计算公式如下^[3]:

$$\text{样本的均值: } \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$\text{样本的标准偏差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: n 是样本的数量。

该核电厂压力管超声检查系统的高频纵波探头B扫描模式,精度是 $\pm 0.02\text{mm}$,根据以上分析可知,使用该系统对一个 0.11mm 的缺陷进行测厚,测厚数据落在 $0.09\sim 0.13$ 范围内的概率是68.3%,测厚数据在 $0.09\sim 0.13$ 之外的概率为31.7%。所以测得有深度为 0.19mm 的显示信号也是符合统计学规律的。

4 结论

超声检查对象表面不平整,检查系统本身存在

系统误差,使检查数据也会存在误差,检查数据总体上服从正态分布规律。高精度超声检查时,需要检查人员根据经验多次测量部件尽可能判断准确信号,如果对精度要求高,还要利用复检技术对信号进行准确的复核。

该核电厂某根压力管的1#缺陷的第2次超声测量的深度大于第1次超声测量的深度,是因为第2次测量的深度与实际深度存在一定的偏差,缺陷并没有明显变化,缺陷无需进行处理,不会对反应堆重返临界造成影响。测量结果与真实尺寸存在偏差是符合正态分布规律的,超声检查系统和检查结果都不存在问题。

参考文献:

- [1] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:171-172.
- [2] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册·超声卷(下册)[M]. 北京:世界图书出版公司,1996:90-93.
- [3] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1989:99-111.

(上接第61页)

在一些特殊需要的场合,例如对观察的目标进行选择性的观察,还可以配合不同光谱的光源,来达到理想的效果。

4 结语

总之,内窥镜照明光源的选择需要一定的研究及设计经验,综合考虑观察的环境、目标的大小、目

标的性质、内窥镜头端部的尺寸及成本等,设计出符合需求的合适的照明方式。

参考文献:

- [1] 郑振亚,陈琨. 医用纤维内窥镜的发展及其临床应用[J]. 军队卫生装备,1985(2):32-34.
- [2] 徐明泉,朱云青,赵锦琳. 传光束端面的光纤排列[J]. 玻璃纤维,2003(2):23-25.