

视差法及 CIVA 仿真在数字射线检测缺陷深度定位中的应用

华雄飞¹, 樊明岩², 刘 顺¹, 林世昌¹, 范 义¹

(1. 中广核检测技术有限公司, 苏州 215021; 2. 辽宁红沿河核电公司, 大连 116300)

摘 要: 介绍了精确式视差法测量缺陷深度的原理, 通过带缺陷试样的数字射线透照试验, 结合 CIVA 软件仿真模拟, 探究了该方法的可行性, 分析了影响测量精度的因素。采用数字成像技术替代常规胶片成像技术, 弥补了其检测效率低、测量困难、测量误差大等不足。同时引入了验证标记对测量结果进行准确验证, 避免了因操作原因造成的定位误差。

关键词: 射线检测; 缺陷; 深度定位; CIVA 仿真

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2019)05-0014-04

Application of Parallax Method and CIVA Simulation in Defect Depth Location of Digital Radiography Testing

HUA Xiongfei¹, FAN Mingyan², LIU Shun¹, LIN Shichang¹, FAN Yi¹

(1. CGNPC Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou 215021, China;

2. Liaoning Hong Yan He Nuclear Power Co., Ltd., Dalian 116300, China)

Abstract: In this paper, the principle of measuring the depth of defects by parallax method is introduced. Through the digital radiography testing with defective workpiece and CIVA simulation, the feasibility of the method is explored and the factors influencing the measurement accuracy are analyzed. Digital radiography technology makes up for the disadvantages of conventional film imaging technology such as low detection efficiency, difficulty in measurement, and large measurement error. At the same time, the verification mark is introduced to accurately verify the measurement result, and the positioning error caused by the operation is avoided.

Key words: radiographic testing; defect; depth positioning; CIVA simulation

作为五大常规无损检测方法之一的射线检测, 其在工业上有着广泛的应用^[1]。一般的射线检测技术是典型的二维成像技术, 只能测量缺陷在投影面方向上的位置和尺寸, 无法反映其厚度方向的位置和尺寸信息^[2]。在实际工业应用中, 因无损评价、焊缝质量评级以及缺陷修补的需要, 工业无损检测时需要准确获取焊缝内部缺陷的深度信息^[3-4]。

目前, 国内外对缺陷深度测量的方法主要有超声波法和射线成像法, 射线成像法又分为工业计算

机断层扫描(CT)法、黑度法、体视法及视差法等^[3,5-6]。笔者重点研究了射线视差法, 通过原理分析、CIVA 软件仿真模拟以及试块数字射线透照试验, 探讨了视差法在缺陷深度定位上的可行性, 分析了影响缺陷深度测量精度的主要因素。

1 视差法原理及测量误差分析

1.1 视差法原理

视差法缺陷深度定位原理示意如图 1 所示, 通过改变放射源的位置拍摄两张数字射线(DR)图像, 根据图 1 中的相似三角形关系可得

$$H = \frac{F \times K}{L + K} \quad (1)$$

式中: H 为缺陷至成像平面的距离; F 为射线源至成

收稿日期: 2018-08-17

作者简介: 华雄飞(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事核电站役前、在役无损检测工作

通信作者: 林世昌, 674349991@qq.com

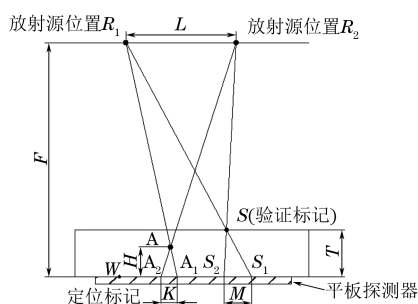


图1 视差法缺陷深度定位原理示意

像平面的距离; L 为射线源移动的距离; K 为缺陷影像位移。

1.2 视差法测量误差分析

由式(1)可知,缺陷至成像平面的距离 H 和缺陷影像的位移 K 之间不是线性关系,但在实施射线检测时,受几何不清晰度的影响,一般 $F \gg T > H$, 则有 $L \gg K$, 因此式(1)可以近似地表示为式(2),即缺陷 A 至成像平面的距离 H 与缺陷影像的位移 K 近似成线性关系($H \propto K$)。

$$H \approx \frac{F \times K}{L} \quad (2)$$

由式(2)可知,最终测量的缺陷至成像平面的距离 H 由 F 、 L 、 K 共同决定,由于 F 和 L 的值远大于 K , 使用单变量法分析式(2)可知,焦距 F 和平移距离 L 的微小误差对 H 的测量结果影响较小,而 K 的测量误差会对最终的结果造成较大的影响。 F/L 可以看成是 K 的放大系数,因此为了减小测量误差,在满足几何不清晰度的前提下,应适当减小焦距 F 和增大平移距离 L 。

在实际应用时,为了减小焦距 F 和平移距离 L 的测量误差对结果的影响,引入一个定位标记 S (见图1),根据图中相似三角形关系有 $L/M = F/(F - T)$, 即 $M = L(F - T)/F$, 通过对比较验证标记影像位移 M 的实测值和理论值,判断 F 和 L 是否有较大误差。针对 K 值误差对结果的影响,采用 DR 技术替代胶片成像技术,检验现场直接输出数字图像,

在图像软件上实现长度测量、图像叠加等功能,能方便准确地测量出缺陷影像的位移。

通过分析可知,利用视差法测量缺陷深度的主要工艺参数是焦距 F 和平移距离 L , 减小焦距和增大平移距离能减小测量误差,但是焦距过小不能满足几何不清晰度的要求,平移距离过大容易导致缺陷影像畸变。笔者以 CIVA 仿真模拟为主,试块透照试验为辅,研究了射线视差法测量缺陷深度的可行性,同时在满足几何不清晰度的条件下选用小焦距,以平移距离、缺陷深度为变量,分析其对测量精度的影响。

2 CIVA 仿真软件模拟

CIVA 仿真软件的工作界面如图2所示,软件的模拟参数如下:射线源为 Ir192 源,源尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 焦距为 500 mm,透照方式为单壁透照;试样材料为奥氏体不锈钢,规格(长 \times 宽 \times 高)为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 模拟缺陷为 $\phi 3 \text{ mm}$ 球孔,试样1~试样4的缺陷深度分别为 5, 15, 25, 35 mm。

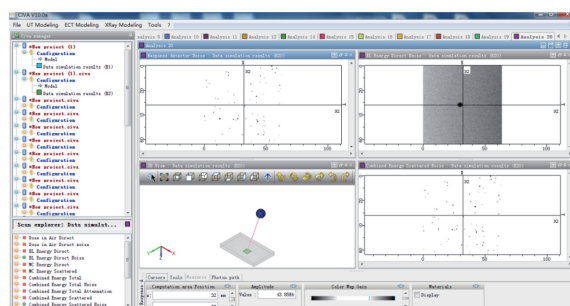


图2 CIVA 仿真软件工作界面

2.1 平移距离为变量时的仿真模拟

以放射源的平移距离为单一变量,选用试样3作为模拟试样,焦距为 500 mm,在初始位置处及将放射源分别平移 50, 100, 150, 200 mm 时进行仿真模拟,软件模拟影像如图3所示,影像位移及测量深度如表1所示。

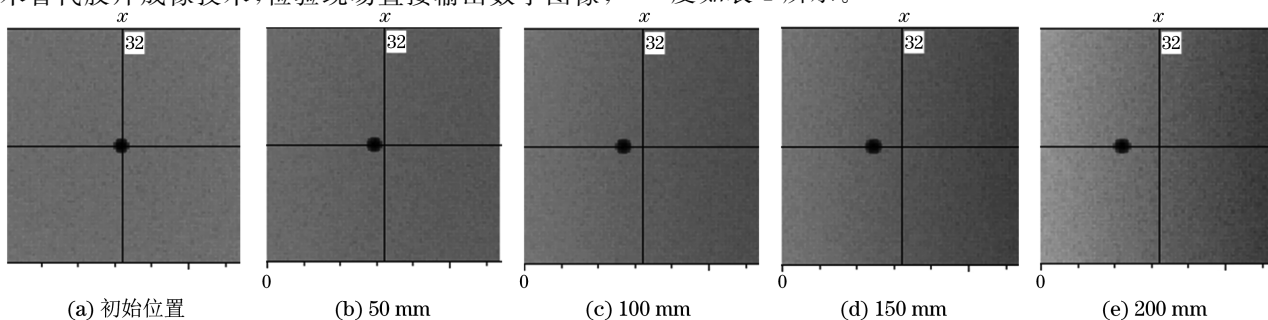


图3 不同平移距离时的软件模拟影像

表 1 不同平移距离时的软件影像位移和测量深度 mm

参数	平移距离			
	50	100	150	200
影像位移	1.5	3.0	4.5	6.0
测量深度	25.4	25.4	25.4	25.4

由表 1 可知,通过平移放射源,工件的缺陷影像位置随之发生改变,缺陷影像的移动距离与平移距离近似成正比关系。通过式(1)可求得缺陷深度,结果显示,缺陷测量深度与实际深度相差不大。

2.2 缺陷深度为变量时的仿真模拟

以试样缺陷深度为单一变量,焦距为 500 mm,将放射源平移 200 mm,对试样进行两次射线检测模拟,试样缺陷深度分别为 5,15,25,35 mm,其软件模拟影像如图 4~7 所示。

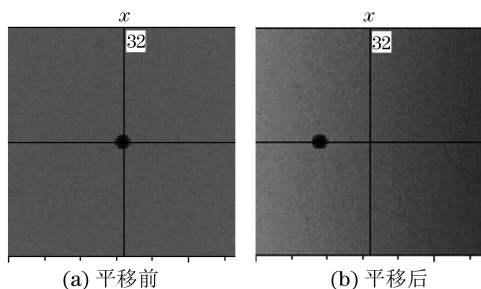


图 4 缺陷深度为 5 mm 的软件模拟图像

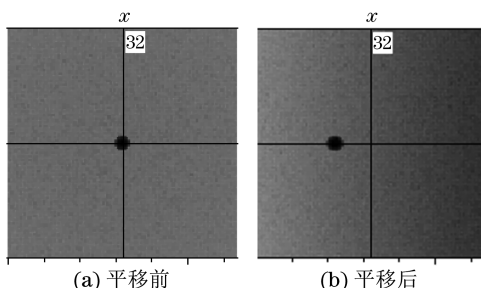


图 5 缺陷深度为 15 mm 的软件模拟图像

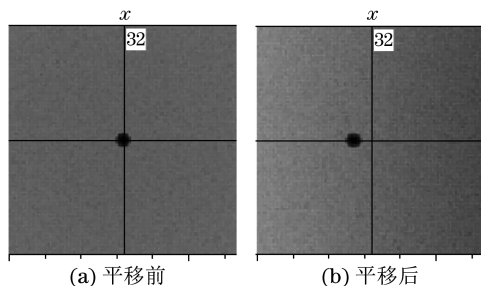


图 6 缺陷深度为 25 mm 的软件模拟图像

由图 4~7 可知,随着缺陷深度的增加,缺陷影像的移动距离逐渐减小,缺陷影像的位移与缺陷到成像面的距离近似成正比关系,通过式(1)计算缺陷

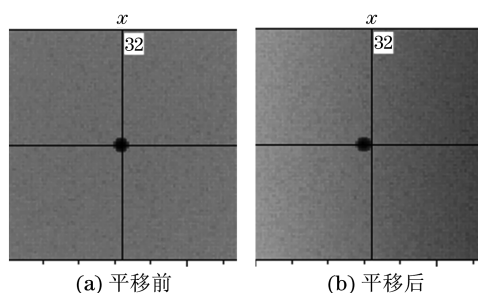


图 7 缺陷深度为 35 mm 的软件模拟图像

的深度,结果显示其测量值与实际深度相差不大。不同缺陷深度的软件模拟结果如表 2 所示。

表 2 不同缺陷深度时的软件模拟结果 mm

参数	缺陷实际深度			
	5	15	25	35
缺陷到成像面的距离	35	25	15	5
缺陷影像位移	15	10.3	6	2
缺陷测量深度	5.1	15.5	25.4	35

通过 CIVA 软件仿真模拟及对模拟结果分析可知,采用射线视差法对焊缝缺陷深度定位的可行性很强。在焦距一定的情况下,同一缺陷影像的位移与射线源的平移距离近似成正比关系;焦距和射线源平移距离固定时,缺陷影像的位移与缺陷至成像平面的距离也近似成正比关系。

3 试块透照试验

选用厚度分别为 5,10,20 mm 的不锈钢试块,其中厚度为 5 mm 的试块 2 块,其余厚度试块 1 块,将其叠加成厚度为 40 mm 的模拟试块(见图 8)。试块尺寸均为 150 mm×80 mm(长×宽),其中 10 mm 厚试块表面有较多人工缺陷(见图 9),此次试验选用缺陷 A 作为试验模拟缺陷,其余 3 块试块均为内部无缺陷的标准试块。通过改变叠加顺序,将人工缺陷 A 的深度位置分别定为 5,15,25,35 mm。

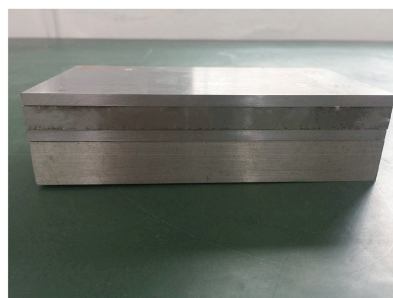


图 8 叠加后的试块外观

试块透照试验方案与 CIVA 仿真模拟方案类似,分别改变放射源的平移位置和试块缺陷深度对

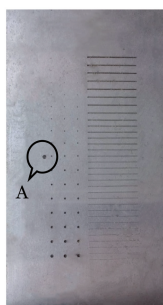


图9 人工缺陷试块外观

试块进行透照试验。采用数字射线成像技术实现检测图像的数字化,可通过软件进行图片叠加,与胶片成像技术相比,其测量缺陷影像的平移距离更加准确。改变放射源位置的两次射线检测图像及经过图像叠加后的图像如图10所示,其中 A_1 、 A_2 分别是两次试验后缺陷的影像,在软件上能直接测出缺陷影像的位移。图像上“0”为定位标记,“S”为验证标记,平移后,定位标记影像不移动,验证标记和缺陷影像移动距离能通过软件测出。

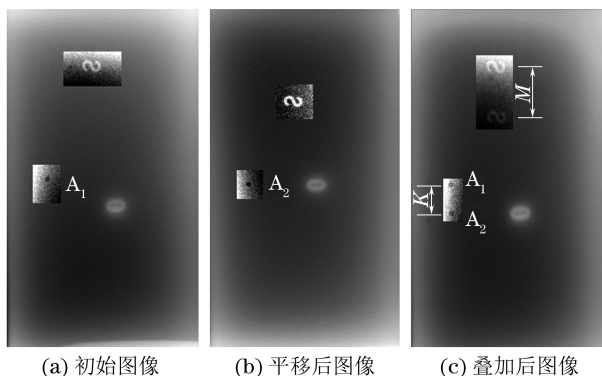


图10 改变射线源位置时的数字射线检测图像

3.1 不同放射源平移距离时的试块透照试验

试验焦距为500 mm,人工缺陷深度为25 mm,在初始位置处及将放射源分别平移50,100,150,200 mm时对试块进行多组数字射线成像试验,通过对比验证标记影像平移距离的测量值和理论值,选取误差较小的3组试验,分别测量其缺陷影像的位移,计算其均值后汇总,结果见表3。

表3 不同平移距离时的试块透照试验结果

参数	射线源平移距离/mm			
	50	100	150	200
缺陷影像位移	1.75	3.20	4.75	6.28
缺陷深度计算值	23.09	24.50	24.65	24.78
测量误差	1.91	0.55	0.35	0.22

从表3可知,当放射源平移距离分别为100,150,200 mm时,缺陷深度定位的误差较小(小于0.5 mm);当放射源平移距离为50 mm时,其定位误差相对较大(1.91 mm)。平移距离增大时,缺陷影像位移增大,缺陷深度测量误差相对有所减小。

3.2 不同缺陷深度时的试块透照试验

试验焦距为500 mm,放射源平移距离为200 mm,对缺陷深度分别为5,15,25,35 mm的试块分别进行数字射线成像试验。分别进行多组试验,根据验证标记影像平移距离的测量值和理论值进行对比,筛选出误差较小的3组试验,计算缺陷影像位移均值后汇总,试验结果如表4所示。

表4 不同缺陷深度时的试块透照试验结果

参数	缺陷深度/mm			
	5	15	25	35
缺陷影像位移	15.16	10.67	6.28	2.39
缺陷深度计算值	4.77	14.68	24.78	34.10
测量误差	0.23	0.32	0.22	0.90

从表4可知,对于厚度为40 mm的试块,缺陷深度为5,15,25 mm时,射线视差法缺陷深度定位误差较小(小于0.4 mm);缺陷深度为35 mm时,缺陷深度定位误差相对较大(0.9 mm),此时缺陷影像的位移较小。

3.3 试验结果分析

上述试块透照试验结果表明,利用视差法测量缺陷深度具有很强的可行性。在采用验证标记筛选试验数据后,影响其深度测量精度的主要因素是缺陷影像位移长度的测量。

从图像影像测量角度考虑,缺陷影像的位移越大,其测量相对误差越小,经过大量对比试验发现,当缺陷影像位移大于缺陷尺寸的2倍时,其测量相对误差均在可接受的范围内。因此,在设计试验方案时,应综合考虑影像长度测量精度和影像畸变因素来选择射线源平移的距离。此外,对于靠近成像面的缺陷,为了提高测量精度,可将平板探测器和射线源的位置改变180°进行视差法深度定位。

4 结语

(1) 射线视差法测量缺陷深度具有可行性,其对检测设备要求低、操作简便,可在一定程度上解决缺陷深度定位的难题。

(下转第72页)

表 3 HS-XY-600 移动式高频电源与国外产品指标对比

指标名称	高频高压发生器 (瑞士 COMET)	高频高压发生器 (HS-XY-600)
输出管压范围/kV	50~600	50~600
管压步长/kV	0.1	0.1
管压绝对精度/%	±1	±1
管压重复精度(温度恒定)/%	±0.1	±0.1
输出管流范围/mA	0.5~10	0.5~10
管流步长/mA	0.1	0.01
管流绝对精度/%	±1	±1
管流重复精度(温度恒定)/%	±0.01	±0.01
纹波系数/(V·mA ⁻¹)	5	5
高压产生频率/kHz	40	40

经过与进口设备性能数据的对比分析,可以看出 HS-XY-450 和 HS-XY-600 高频 X 射线机在管流调整性能上更为精确,优于进口设备。

2.3 450 kV 和 600 kV 高频 X 射线机应用

450 kV 和 600 kV 高频 X 射线机产品问世后,经多方用户使用,得到了一致的好评和认可。用户反馈使用情况具体如下所述。

(上接第 17 页)

(2) 采用数字成像技术替代胶片成像技术,实现了检测图像的数字化,通过图像软件进行图像叠加和长度测量,提高了检测效率,弥补了胶片成像技术测量缺陷影像位移长度的困难、测量误差大等不足。

(3) 在工件表面贴附一个验证标记,通过对比验证标记影像平移距离的测量值和理论值,筛选了试验数据,避免了因操作原因造成的定位误差。

参考文献:

- [1] 郑世才.射线检测[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 蔡闰生,任华友.X 射线照相缺陷定位方法分析与验证[J].宇航材料工艺,2013,43(3):129-133.
- [3] 李衍,李华.焊缝射线照相缺陷测深技术[J].中国锅炉压力容器安全,2001,17(5):40-43,46.
- [4] 杨飞.X 射线数字成像中的缺陷定位检测技术研究[D].太原:中北大学,2003:6-7.
- [5] 刘海强,熊瑛,郭佳,等.射线平移二次缺陷定位方法的探讨[J].无损探伤,2016,40(5):43-45.
- [6] 张军辉.钛合金焊接结构缺陷检测与定位方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:6-7.

(1) 由于设备管电流大,曝光时间减少了一半,效益提高了近一倍。

(2) 检测灵敏度由原来的 1.5%~2% 范围提高到 1.0%,大大提高了检测的可靠性。

(3) 设备的重复精度高,底片黑度均匀,底片的合格率达到 100%。

(4) 工作频率达到 40 kHz,成像清晰稳定,特别适合作为工业 CT 光源。

3 结语

HS-XY 系列高频移动式 X 射线机的研制成功,提高了国产 X 射线机的整体技术水平,打破了国外产品对中国市场高端产品的垄断,填补了国内的空白,对我国无损检测行业的技术进步起到了很大的促进作用,同时也提高了企业的综合实力。

参考文献:

- [1] 张占松,蔡宜三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,1998.
- [2] 戚栋,王宁会.实用电源技术手册 特种电源分册[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2005.

(上接第 46 页)

5 改进建议

根据试验结果以及分析,为了避免热处理零件反复出现磁痕,提出以下改进建议:

(1) 用 4340 板材加工的零件,在热处理后磁粉检测显示的磁痕并非裂纹,而是由合金偏析引起的,可以在尺寸公差允许的范围内进行打磨消除。

(2) 对 4340 板材加工的重要零件,建议在热处理前增加均匀化处理工序,以减小合金偏析。

(3) 根据上述试验可知,原材料为锻件的试验件无此“磁痕显示”现象,建议该零件采用 4340 锻件制造。

参考文献:

- [1] 龙晓华.磁粉探伤中磁痕显示的分类、判定及处理[J].中国新技术新产品,2011(10):148.
- [2] 刘靖波.17-4PH 不锈钢磁粉检测中出现的问题分析[J].无损检测,2015,37(5):20-23.