

管道焊缝超声多维成像检测技术

刘松平¹, 刘菲菲¹, 张丙法², 王瑞川¹, 李乐刚¹, 关洪光²

(1. 北京航空制造工程研究所 无损检测中心, 北京 100024; 2. 山东电力研究院, 济南 250002)

摘要:通过超声 C 扫描和三视投影成像技术对管道焊缝缺陷进行定性定量评估和诊断分析。研究与应用结果表明, 采用超声自动扫描多维投影成像方法可以直观地得到焊缝区缺陷的位置、大小、分布和取向等特征信息, 使缺陷识别的准确性和检测可靠性明显提高。该项技术已在电力等工业部门管道焊缝的无损检测中得到应用。

关键词:超声多维成像; 缺陷检测; 管道焊缝

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)02-0077-04

Multiple-View Ultrasonic Imaging Technique for Pipe Welds

LIU Song-Ping¹, LIU Fei-Fei¹, ZHANG Bing-Fa², WANG Rui-Chuan¹, LI Le-Gang¹, GUAN Hong-Guang²

(1. The Research and Development Center for NDT&E Techniques, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: A new nondestructive testing and evaluation (NDT&E) technique by using multiple-view ultrasonic imaging based on mobile automated scanning system for pipe welds in-service was described. Ultrasonic C-scan and three-dimensional P-scan were established to evaluation and diagnosis of defects in pipe welds. The results presented showed that the characteristics of defect in weld, for examples, location, distribution and orientation and size of defects and so on, were be exhibited well by employing the approach. It offered an effective instrument for improving NDT&E detectable probability and reliability of finding defects. The developed multiple-view ultrasonic imaging technique had been applicated in NDT&E of pipe welds in steam power industry so far.

Keywords: Ultrasonic multiple-view imaging; Defect evaluation; Pipe welds

管道焊接已广泛应用于电力、石化、石油燃汽管道等重要工业领域^[1,2]。焊缝质量和焊缝缺陷直接影响管道焊接结构的性能、可靠性和使用寿命。目前主要通过管道焊缝质量控制和缺陷检测两种途径来保证管道安全运行。

目前国内外多采用超声和射线检测两种方法控制和检测管道焊缝质量^[1-6]。超声检测简单方便, 适于外场检测, 通过选择合理的声束入射方向, 可以灵敏地发现焊缝区内常见的焊接缺陷, 因而已成为焊缝检测的主要无损检测方法。

普通的焊缝超声检测主要是利用检测人员手工移动换能器, 观察超声仪器的 A 显示波形进行缺陷判别, 缺陷判别受检测人员主观因素的影响, 容易漏检。因此, 发展自动化扫描检测技术和缺陷再现技术是近年来国内外研究的一个主要方向^[2]。为此, 笔者研制了一种基于便携式自动扫查系统的超声多维成像检测技术。

1 超声多维成像检测原理

1.1 焊缝超声检测与缺陷定位方法

对于管道对接焊缝, 由于焊缝区内可能产生的缺陷取向关系, 需设计合适角度的超声换能器, 使入射声束与焊缝区熔合界面和缺陷取向垂直(图 1)。在给定的灵敏度条件下, 根据缺陷回波信号所在的时域位置和换能器与被测焊缝的几何关系, 确定缺

收稿日期: 2007-01-23

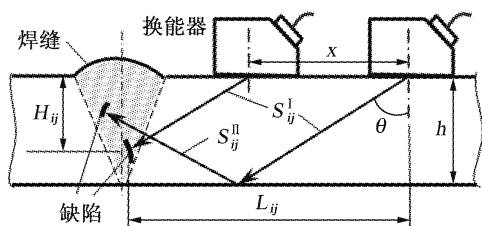
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572099)

作者简介: 刘松平(1962—), 男, 俄罗斯莫斯科国立大学理学博士, 研究员, 全国无损检测学会常务理事, 《无损检测》副主编, 主要从事材料及其结构的无损检测技术与开发。

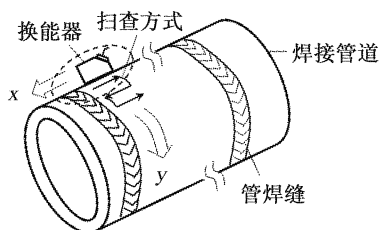
陷位置。通常利用换能器在焊缝一侧扫查,通过入射声束在管壁产生的一次透射声波和一次反射声波对不同位置和深度的缺陷进行检测。换能器的扫查范围 x 为:

$$x = 2h \tan \theta \quad (1)$$

式中 h ——管壁(焊缝)厚度;
 θ ——换能器(入射声束)折射角。



(a) 焊缝缺陷声程定位方法



(b) 管道焊缝超声扫查

图1 管道焊缝超声检测与缺陷定位方法

用 $U_{ij}^0(S_{ij}, L_{ij}, H_{ij}, \theta, A_{ij}^D)$ 表示换能器在任意扫查位置的检测信息特征参量,这里 $S_{ij} = S_{ij}^I + S_{ij}^{II}$, S_{ij}^I 为对应于第 i 个扫描行第 j 个检测位置的一次折射波声程; S_{ij}^{II} 为对应于第 i 个扫描行第 j 个检测位置的二次反射波声程,且 $S_{ij} = tv$, t 和 v 分别为声波在管壁中传播时间和传播声速; L_{ij} 为缺陷离换能器入射点的水平距离; H_{ij} 为缺陷的深度; A_{ij}^D 为缺陷回波信号 D 的波高。

当换能器在某个扫查位置接收回波信号 D , 且 $A_{ij}^D > A_{Th}$, 表明焊缝区存在超标缺陷, 这里 A_{Th} 为设定的缺陷判别阈值。缺陷在焊缝中的几何位置可以根据缺陷回波信号 D 的声程 S_{ij} 和换能器与被测焊缝的几何关系确定:

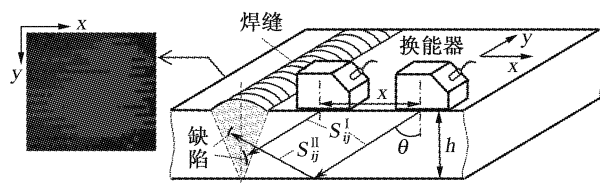
$$L_{ij} = S_{ij} \sin \theta$$

$$H_{ij} = S_{ij}^I \cos \theta \text{ 或 } H_{ij} = 2h - S_{ij}^I \cos \theta \quad (2)$$

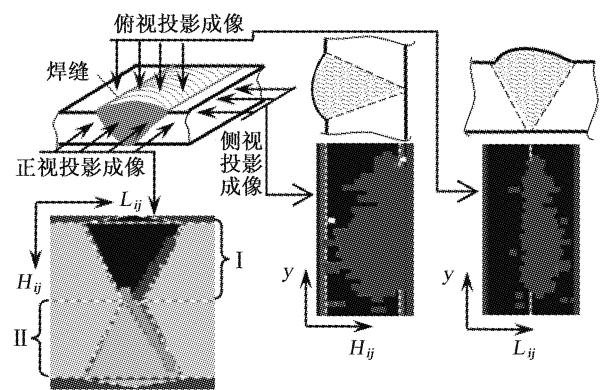
为得到焊缝在厚度方向的缺陷信息, 可通过换能器沿垂直焊缝方向(即 x 方向)的扫查, 实时记录换能器在该扫查行(如 $i = k$) 中的每一个检测位置的信息特征参量为 $\sum_{j=1}^m U_{ij}^0(S_{ij}, L_{ij}, H_{ij}, \theta, A_{ij}^D) |_{i=k}$,

这里 m 为对应第 k 个扫查行的检测位置点数, m 的大小与换能器扫查速度、信号记录处理时间等有关。根据特征参量中的 A_{ij}^D 判别对应扫描检测位置焊缝中是否存在缺陷, 缺陷在焊缝中的位置由式(1)和(2)确定。

为了实现管道焊缝的 100% 扫查, 得到整条焊缝的质量信息, 通过换能器沿 x 方向扫查 y 方向(即平行焊缝方向)步进, 如图 2 所示, 并实时记录换能器在每一个扫查行的每一个检测位置的信息特征参量 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{ij}^0$, 判别整个焊缝中是否存在缺陷及其缺陷的准确位置, 这里 n 为完成整条被检测焊缝所需的扫查行数, 其值大小与焊缝的长度和扫查步距有关。根据换能器的扫查位置 and 对应每一个检测位置的信息特征参量, 可以通过多维图像方式再现检测结果。



(a) C扫描成像



(b) 三维投影成像(P扫描)示意

图2 管道焊缝超声 C扫描和三维 P扫描成像方法

1.2 焊缝超声多维成像方法

超声扫描成像是基于换能器在被检测材料或结构的物理位置坐标和超声信息, 采用不同颜色或灰度图像的形式再现其内部缺陷或结构信息。图像中每一点的位置坐标由扫查过程中换能器所在的实际检测点位置确定, 图像中各点的颜色或灰度受超声信号(如信号检测闸门内回波幅度)调制^[7]。如用函数 $P_{ij}^0(x, y)$ 表示换能器在某管焊缝扫描位置坐标, 则每个扫查检测点对应的焊缝状态可表示为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}^0(x, y) \quad (3)$$

对应图像域,其成像显示点可表示为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}^1(x, y) \quad (4)$$

这里 (x, y) 对应每一检测点在图像中的坐标,且 $P_{ij}^1(x, y)$ 与 $P_{ij}^0(x, y)$ 严格单值对应,位置坐标信息 $P_{ij}^0(x, y)$ 通过扫描机构实时反馈; (r, g, b) 为图像调色板的三基色,通常由 $U_{ij}^0(S_{ij}, L_{ij}, H_{ij}, \theta, A_{ij}^D)$ 中的 A_{ij}^D 分量调制,实际成像检测时,通过信号处理电路和设置合理的信号检测闸门获取 A_{ij}^D 分量。

若以换能器的位置坐标 (x, y) 为成像坐标,利用 $P_{ij}^1(x, y)$ 与 $P_{ij}^0(x, y)$ 的映射关系,可以实现管焊缝的超声 C 扫描成像(图 2a)。C 扫描图像中每一点坐标 $P_{ij}^1(x, y)$ 与换能器扫描的实际位置坐标 $P_{ij}^0(x, y)$ 对应,图像的颜色由换能器接收到的检测信号特征参数 $U_{ij}^0(S_{ij}, L_{ij}, H_{ij}, \theta, A_{ij}^D)$ 中的 A_{ij}^D 分量确定。在 C 扫描图像中可以直观地显示换能器所在位置的焊缝中是否存在缺陷。但对于管焊缝,由于采用超声反射法检测,缺陷位置并不是换能器所在的实际位置,缺陷在焊缝中的实际位置需要根据 $U_{ij}^0(S_{ij}, L_{ij}, H_{ij}, \theta, A_{ij}^D)$ 中的声程分量 S_{ij} ,利用式(1)和(2)计算确定。利用式(3)和(4),通过不同的坐标映射关系,可以实现管焊缝的多维超声投影扫描成像——三维超声 P 扫描成像,如图 2b 所示:

(1) 正视投影成像 以 L_{ij} 为 x 坐标, H_{ij} 为 y 坐标,能给出缺陷在焊缝扫描截面内分布和整条焊缝每一个扫描截面的超声正视图像。

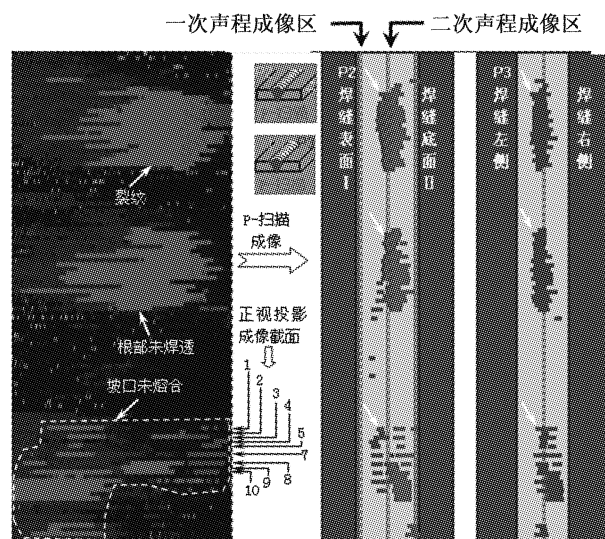
(2) 俯视投影成像 以 (L_{ij}, y) 为成像位置坐标,能给出缺陷沿焊缝宽度方向和长度方向的分布。

(3) 侧视投影成像 以 (H_{ij}, y) 为位置成像坐标,能给出缺陷沿焊缝厚度方向和长度方向的分布。

2 典型检测结果与分析

图 3 是某管道焊缝的超声自动扫描多维成像检测结果。试样由山东电科院提供,直径为 273 mm,焊缝厚度为 25 mm,通过控制焊接工艺的方法在管道焊缝中不同位置分别预制了裂纹、根部未焊透和坡口未熔合三种焊接缺陷。检测采用北京航空制造工程研究所生产的 MUI-21A 便携式管道焊缝超声

自动扫描检测系统。超声波工作频率为 2.5 MHz,声束入射角 63°,超声换能器沿管道焊缝轴向 x 扫描,沿周向 y 步进(图 1b)。根据式(1)选择 x 方向扫描范围为 100 mm,入射点离焊缝 30 mm。从图 3a 中超声 C 扫描结果可以清晰地看出三个预制缺陷,并且坡口未熔合与裂纹和未焊透在图像分布上有明显不同的区别,即坡口未熔合没有连成片,而裂纹和未焊透则是连成片,这是因为在未熔合区域,有的位置可能发生了熔合。从图 3b 和图 3c 中的侧视和正视投影成像可以更进一步看出缺陷的分布特点,即裂纹主要位于焊缝根部附近;坡口未熔合与根部未焊透具有明显不同的图像分布特征;三种缺陷中的大部分是通过超声波的二次反射检测出来的。



(a) C 扫描 (b) 侧投影 (c) 俯视投影

图 3 管道焊缝缺陷超声 C 扫描和 P 扫描成像结果

为了得到缺陷在焊缝厚度方向的分布,可以沿焊缝方向进行连续的正视投影成像,对缺陷在焊缝中的分布和取向进行三维重构。图 4 是在 C 扫描成像中对坡口未熔合区给定的焊缝扫描截面 1, 4 和 8 正视投影成像结果。图 4 可看出对应该焊缝断面的坡口未熔合在焊缝中的分布(I 区),为了便于分析缺陷图像与声程的对应关系,在图 4 中的正视投影成像结果中,还给出了二次声程成像的未焊合缺陷图像(II 区),较为直观地反映出缺陷成像与声程的对应关系。

值得指出的是,在自动扫描过程中,只需要对焊缝进行一次 C 扫描,全部信息都会自动按给定的数据格式实时记录,在焊缝检测完毕,通过三视投影成像可以十分方便地在计算机屏幕上快速显示焊缝任

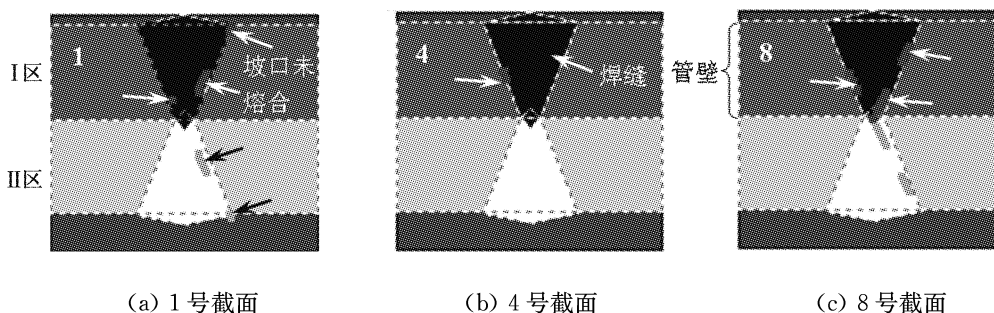


图4 坡口未熔合系列正视投影成像

意一处断面位置和投影方向的图像和对应的缺陷显示波形、波高、缺陷深度、声程和水平位置等,从而可确切地进行缺陷判断。也可通过设置不同的灵敏度、增益补偿数和阈值等对已获得的检测结果进行虚拟扫描,从而可节省时间和成本,提高检测效率。

3 结论

利用超声检测特征信息参量和换能器扫描位置信息,通过超声C扫描和三维投影成像(P扫描)相结合的全信息处理方式,可以有效地得到焊缝缺陷的分布、位置、大小和三维取向特征等,有助于提高焊缝缺陷的检出率和准确率。目前该项技术和设备已在电力等工业部门管道焊缝的无损检测中取得了较好的实际应用效果。

参考文献:

[1] Baldev Raj C V, Jayakumar Subramanian T. Non-destructive test of welds[M]. Alpha Science International Ltd, 2000.

- [2] Raad de J A, Dijkstra F H. Mechanized ultrasonic testing on girth welds during pipeline construction[J]. Materials Evaluation, 1997, 55(7): 890—895.
- [3] Ditchburn R J, Burke S K, Scala C M. NDT of welds: state of the art[J]. NDT&E International, 1999, 29(2): 111—117.
- [4] Baldev Raj, Subramanian C V. Nondestructive testing of welds[J]. Materials Evaluation, 1999, 57(12): 1251—1254.
- [5] Stuart Kleven. Ultrasonic inspection of explosion welded titanium clad plate[J]. Materials Evaluation, 1996, 54(5): 557—560.
- [6] Subramanian C V, Thavasimuthu M, Rajagopalan C, et al. Ultrasonic test procedure for evaluating fuel clad endcap weld joints of PHWRs[J]. Materials Evaluation, 1995, 53(11): 1290—1295.
- [7] 刘松平,陈积懋,郭恩明. 先进的超声手动扫描成像检测技术[J]. 无损检测, 1997, 19(6): 151—153.

(上接第76页)

- [11] 郑南宁. 数字信号处理[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1991.
- [12] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助小波分析与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [13] 刘晓彬, 杨起明. 小波分析在无损检测中的应用[J]. 中山大学学报, 2004, 43: 170—173.
- [14] 王 铮, 卢 超, 邬冠华, 等. 舰船钛合金超声检测信号模型及模极大值小波去噪算法分析[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 67—71.
- [15] 彭家宁, 胡天明, 罗 斌, 等. 小波尺度加权法在粗晶材料超声波检测中的应用[J]. 无损检测, 2005, 27(4): 178—180.

摘要撰写

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地论述文献重要内容的短文,因此,必须符合拥有与论文同等的主要信息的原则。摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其它重要信息,内容不应空洞、过简,应具备四个要素,即研究目的、方法、结果和结论,其中,后两个是最重要的。中文摘要一般为200字左右,如需要可以略多;英文摘要内容应与中文摘要一致。

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告