

直接数字化 X 射线摄影系统在压力管道中的应用

蔡宇

(资阳市特种设备监督检验所 四川 资阳 641300)

摘要: 射线检测是一种常见的无损检测 (Nondestructive Testing) 方法, 主要用于检查材质或设备中的埋藏性缺陷。随着技术的发展, 直接数字化 X 射线摄影系统 (DR) 逐步取代传统胶片技术, 成为小管径压力管道的主流无损检测技术。本文分析了射线检测基本原理和 DR 技术的优势, 通过对钢质管道和 PE 管道焊接接头、含保温层管道的 DR 成像进行分析, 进一步阐述 DR 技术的优势和技术不足, 提出了 DR 技术向自动化和智能化的发展方向, 为 DR 技术在管道无损检测方向的进一步应用提供了试验基础。

关键词: 无损检测; 射线检测; DR 技术; 压力管道

0 引言

焊接结构在建筑、汽车、航空航天、铁路、石油化工、机电等领域有着广泛的应用。焊接过程中由于环境条件和焊接工艺的不同, 不可避免地会产生各种焊接缺陷。为确保焊接结构的可靠性和安全性, 需要严格检查焊接接头质量, 避免焊接失效造成灾难性事件。无损检测作为检测焊接结构质量最常用的方法, 包括射线检测、超声波检测、磁粉检测和液体渗透检测。射线检测技术 (RT) 是一种应用最广泛、时间最久远的无损检测技术之一, 自 19 世纪以来, 广泛应用于医学、材料等领域。目前, RT 仍是许多行业进行焊接接头质量控制的基本方法^[1]。

随着科学技术的发展, 电子信息领域在 RT 检测技术中得以应用。1984 年, 由 Frances Mouyens 发明了第一个用于医学领域的直接数字成像系统^[2]。经过近 40 年的发展, 目前已广泛应用于化工、管道、锅炉等领域。

1 射线检测原理及方法

胶片检测技术和 DR 检测技术都是基于射线检测的原理: 射线在穿透物体过程中会与物质发生相互作用, 因吸收和散射而使其强度衰减, 强度衰减程度与物质的衰减系数和射线在物质中穿过的厚度有关。如果被透照物体的局部存在缺陷, 且构成缺陷的物质与结构本体物质的衰减系数不同, 则该局部区域的透过射线强度就会与周围产生差异, 通过对差异情况进行处理, 生成相应的影像。

如图 1 所示, 当强度为 I_0 的射线照射在物体上时, 本体线衰减系数为 μ , 缺陷线衰减系数为 μ' , 那么透过物体不同部位的射线强度表示如下:

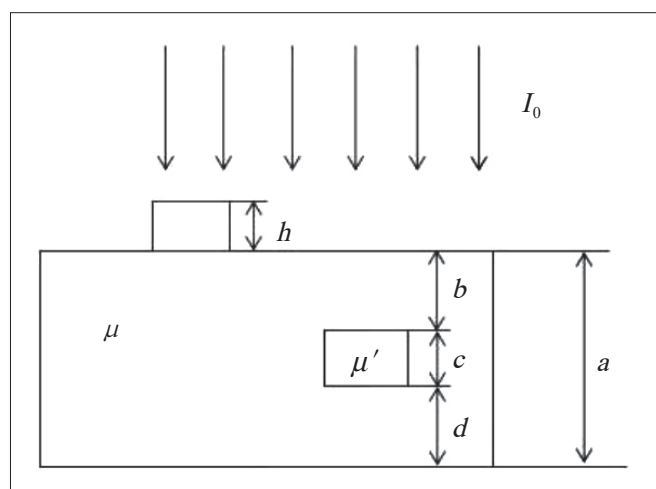


图 1 射线原理图

穿过 h 处的射线强度:

$$I_h = I_0 e^{-\mu(h+a)} \quad (1)$$

穿过 a 长度本体射线强度:

$$I_a = I_0 e^{-\mu a} \quad (2)$$

缺陷表面射线强度:

$$I_b = I_0 e^{-\mu b} \quad (3)$$

穿过缺陷后强度:

$$I_c = I_b e^{-\mu' c} \quad (4)$$

穿过缺陷处的强度:

$$I_d = I_c e^{-\mu d} \quad (5)$$

所以

$$I_d = I_0 e^{[-\mu(a-c) + \mu'c]} \quad (6)$$

因此

$$I_a \neq I_h \neq I_d \quad (7)$$

由此可通过感光材料形成不同的潜影。

1.1 胶片检测技术

胶片射线检测是以胶片为射线的接收器,使其在透过射线的作用下感光,通过暗室处理后得到底片。底片需要观片灯进行观察和测量,分析底片上各点的黑化程度(黑度)相关于射线剂量(射线强度和照射时间的乘积)来确定底片、图像的质量。传统的射线主要是通过 X 射线光机、放射线元素产生具有穿透性的 X 射线、 γ 射线,在卤化银等具有感光性能的胶片上形成潜影,通过显影、停影、定影、水洗、干燥等步骤制成胶片。

1.2 DR 检测技术

现在常用的 DR 检测原理与常规射线相同,最大区别是 DR 采用成像板代替传统胶片接收穿过工件后的射线。衰减后的射线光子由成像器件接收,把射线光子转换成电信号,经过一系列的转换变成数字信号;再经过放大和 A/D 转换等,通过计算机处理,以数字图像的形式输出在显示器上,采用计算机软件对图像进行观察、测量分析^[3-5]。DR 检测技术原理图如图 2 所示。

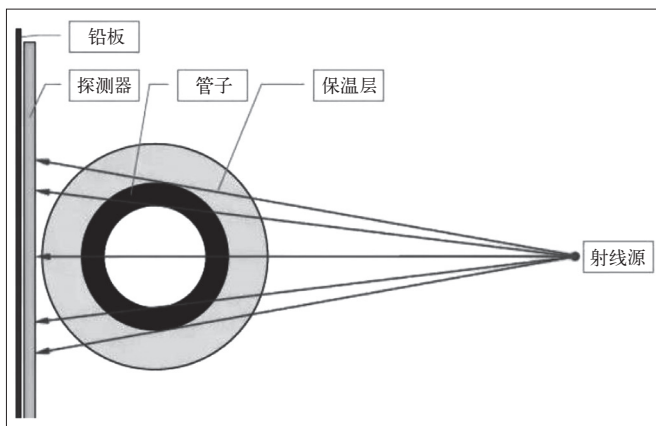


图 2 DR 检测技术原理图

相胶片射线检测技术,DR 具有以下优点:

(1) 由数字探测器代替胶片,免去暗室步骤,减少环境污染;

(2) 图像清晰度高、高分辨率、广灰阶度、信息量大、动态范围大;

(3) DR 成像的辐射小,DR 的平板探测器的灵敏度远高于普通 X 光片,所以它只需要比较小的能量就可获得满意的图像;

(4) 成像板可以反复使用,无需更换,检测效率提高,容易实现自动化;

(5) 成像速度快,动态范围、宽容度大、更容易选择工作参数,重复性好,可显示更多细节;

(6) 可对非金属管道进行检测;

(7) 实现了真正的数字化检验、缺陷识别、数字化传输和存储,传递存储、查询方便,保存时间长;

(8) 后期处理空间大,显示更多样、更直观、评价更准确。

在实际使用案例中由于射线数字成像(DR)技术和传统胶片射线检测的基本原理相同,DR 技术能轻松完成传统胶片射线检测对焊接接头内部缺陷的检测,但是实现了真正的数字化检验、缺陷识别、数字化传输和存储,传递存储、查询方便,保存时间长。后期处理空间大,显示更多样、更直观、评价更准确,这些优势是传统胶片不具备的。

2 DR 在钢质管道中的应用

2.1 焊接接头

DR 在钢质管道中广泛运用,主要优势表现在清晰度高、分辨力强,能较好地分辨出焊接接头缺陷大小、形状、性质,数字化成像便于记录储存,发射射线强度可调,可在有外保温层情况下进行无损探伤^[6-10]。

不同焊接缺陷的 DR 成像图如图 3 所示。图 3(a)为气孔、未融合的 DR 图像,图像中的气孔、未融合线清晰,底部焊瘤明显;图 3(b)为密集型气孔,焊缝上点状气孔分布较为集中;图 3(c)为圆形缺陷;图 3(d)为根部未焊透。

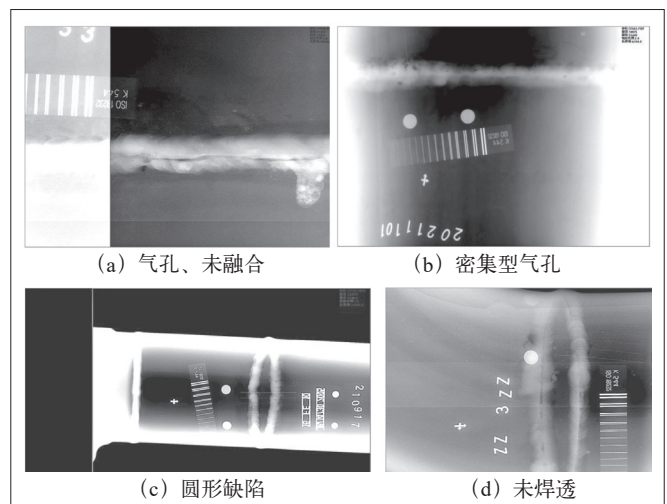


图 3 不同焊接缺陷的 DR 成像图

由图 3 可知, DR 技术对钢质管道焊接的各种缺陷识别较好, 清晰度、分辨力好, 能直观看出焊接缺陷的大小、形状等, 便于判断缺陷性质, 有利于对焊接接头的分级和判定。

2.2 带保温层的管道

在实际使用案例中射线数字成像 (DR) 技术, 可以在不拆除保温层的前提下实现管道腐蚀和缺陷检测。使用该技术检测时, 穿透被检管道的射线被数字探测器阵列 (DDA) 接收, 直接转换成数字图像显示, 无需暗室处理, 宽容度大, 检测效率高, 可自动测量管道壁厚、腐蚀坑、管径等。数字射线图像能在计算机、平板、手机等屏幕上查看, 易于存储、调用、传输和共享, 极大地方便了石油、化工、电力、机械、冶金、制药、食品加工等行业的管道完整性评估和监控。带保温层的 DR 成像图如图 4 所示。

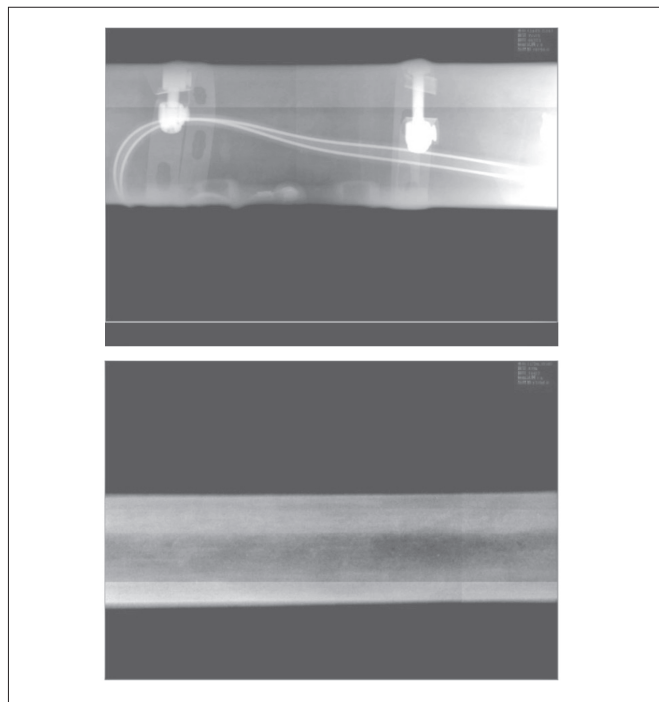


图 4 带保温层的 DR 成像图

DR 技术可应用于在役高温 (超低温) 管道带保温层检测, 可以高效检出和识别管道腐蚀与堆积、壁厚及焊缝缺陷, 便于在役或超期服役管道安全运行的评价及对隐患的及时发现。

DR 技术解决了保温管道常规检测技术给生产带来的停产停运或拆除管道保温层的麻烦, 以及由此造成的经济损失, 还间接地为保温层的评价提供了依据。

DR 技术的应用符合当前国家提倡的节能环保的政策。检测灵敏度较高, 射线剂量较少, 减少了对

员工及公众的辐射危害, 减轻了辐射防护压力。不使用胶片, 没有胶片的暗室处理环节, 消除了化学药剂对环境及人员健康的影响。

受保温层限制及数字平板探测器不能弯曲的影响, 探测器侧和射线源侧的缺陷影像都有不同程度的放大, 对缺陷的判定需要根据数字图像的特点及对比块进行修正。

3 DR 在聚乙烯管道中的应用

在实际使用案例中射线数字成像技术, 由于聚乙烯材料特点, 其对 X 射线的衰减较少, 宜采用较低的曝光能量, 才能得到较好的对比度。可以检测出内部如气孔、夹杂、壁厚不一、电阻丝等缺陷。这是因为 DR 成像速度快, 动态范围、宽容度大、更容易优选工作参数, 重复性好, 可显示更多细节的特性, 这是传统胶片射线难以做到的^[11]。

聚乙烯管道电容接头的 DR 图如图 5 所示, 采用 DR 技术可清晰观察到 PE 焊接接头影像, 电阻丝清晰可见, 同时可根据现场照片质量进行信噪比等参数调试。

3.1 DR 的智能化

X 射线和 γ 射线穿透焊缝结构曝光照相胶片来

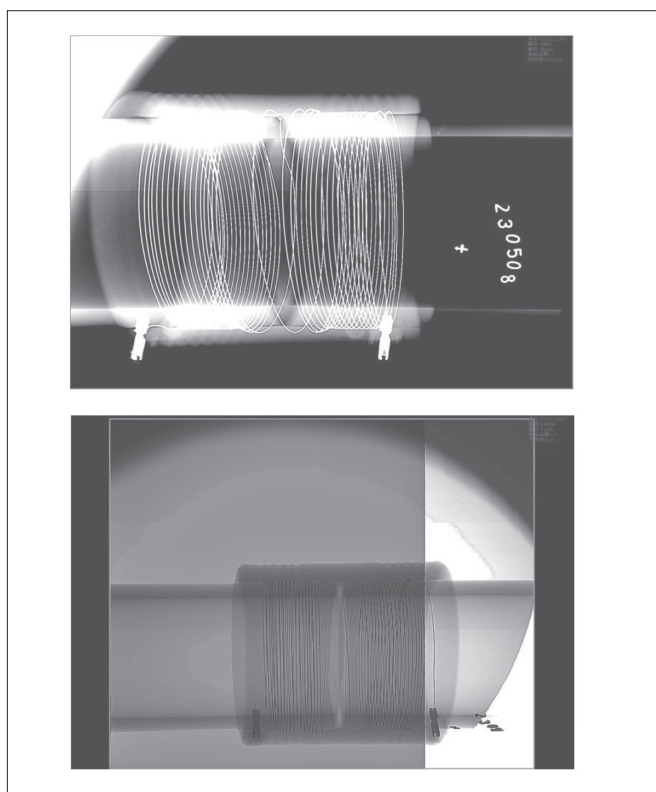


图 5 聚乙烯管道电容接头的 DR 图

产生射线焊缝图像。通常射线强度变化会形成具有焊缝缺陷的胶片。传统胶片由认证检查员检查,以评估和解释焊缝的质量。由于射线照相质量、焊接过厚、对比度差、噪声和缺陷尺寸弱等问题,使得这项工作变得困难。虽然检查人员一般都受过培训,并具备相关的专业知识和经验,但是熟练的检查员仍然很难在短时间内识别出细小的缺陷。

人的解释往往缺乏客观性、一致性和智慧性。由于现代工业生产效率的提高,每天都要生产大量的胶片,人工解说的劳动强度很大。因此,在 20 世纪 90 年代以前,许多研究人员开始建立基于计算机的智能系统,以帮助人类评估焊接质量。这种计算机辅助系统通常以数字图像为对象,通过各种算法提取焊缝并检测图像中的缺陷。目前,已有数字化 X 线摄影系统(数字化仪)可以对 X 线胶片进行数字化处理,而不会丢失原始 X 线照片的有用信息^[12]。

数字化 X 射线图像不仅使射线检测数据的存储、管理和分析变得更加容易,而且使焊缝检测更加智能化成为可能。近几十年来,焊接缺陷的自动检测方法得到了迅速发展,这得益于图像处理、计算机视觉、模式识别和深度学习等技术的发展,提高了对图像的分析能力,在最初的研究中,许多研究者以线图像的灰度图为对象,对二维图像逐行进行处理。因此,用于检测和分类的特征通常是由射线强度的强弱而定,根据强弱不同,可以准确地区分缺陷。然而,由于不同的材料和不同的图像信息,计算机难以识别各种类型的焊接缺陷。为提高图像质量和去除背景以突出缺陷区域,各种图像处理技术被发掘出来。利用几何特征、纹理特征或两者的组合来表征缺陷的形状、尺寸和纹理,以进一步优化和处理图像质量。此外,计算机硬件技术和表征学习技术的发展为焊缝缺陷检测的自动化提供了理想的条件。特别是近年来,随着深度学习理论的发展,在光学图像识别领域中,智能学习图像层次特征和多级结构研究增多。

图 6 为自动化探伤设备。在压力管道焊接结构中,对埋弧焊钢管管端、补焊部位焊缝检测,DR 静态下的检测灵敏度可超过传统胶片射线检测,且 DR 系统在透照状态下,抗磁性强,散射线边蚀影响极小,满足动态和静态实时数字图像要求。设备操作简单化、自动化、流水线作业,极大地提高检测效率,降低生产成本,在钢管制造企业有广阔的推广



图 6 自动化作业

前景^[13]。

3.2 DR 的局限性

DR 技术是数字化、智能化的结晶,操作简便、图像清晰等是它的优势,但相对于胶片技术,DR 也存在自身的局限性。具体如下:

成像板的不可弯曲导致不能紧贴管道,特别是在一些特殊检测空间环境无法实施,而胶片的特性在这些情况下不受影响;

像素尺寸决定了其分辨率低于传统胶片射线检测,对极细小的缺陷灵敏度不如胶片射线;

由于设备工艺和社会生产水平的限制,一次性投入和后期维护成本比传统胶片射线检测高;

目前,自动化作业、智能化评片技术普及程度较低。

4 结语

本文对不同类型的压力管道做了相应的 DR 检测,比较了 DR 用于管道焊接接头缺陷检查的优势。虽然 DR 使用有一定的局限性,且投入和维护成本相对较高,但整体优势比较突出。

(1) 环境友好性: DR 无使用其他化学物质、消耗材料等,射线辐射量小。

(2) 操作便利性: 无需暗室等步骤,设备高度集成化、数字化,可实现自动化。

(3) 成像质量好,可进行分辨率、宽容度、信噪比等调节。

(4) 可实现智能化,利用人工智能深度学习,可进行智能评片。

(5) 数据储存便利,易保存。

未来,DR 技术将会更广泛地应用于管道焊接检测领域。自动化、智能化作业也将成为主流,人工智能识别和评片方式也将逐步登上舞台。

参考文献:

- [1] Seibert J A. X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 1: Basic principles of x-ray production[J]. Journal of Nuclear Medicine Technology, 2004, 32(03):139-147.
- [2] Hosein T, Hasan A. Digital radiography in dentistry[J]. Journal of Pakistan Dental Association, 2004, 13:89-91.
- [3] 陈剑. 在用管道检验射线数字成像外透照检测技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(07):43-45.
- [4] 申路, 玉彪. 数字 X 射线摄影系统平板探测器工作原理分析及故障维修[J]. 中国医学装备, 2022, 19(12):208-210.
- [5] 王克枢, 肖杰. 数字化 X 线摄影技术原理及应用分析[J]. 医疗装备, 2015, 28(01):23-24.
- [6] 李少云, 王小伍, 高建忠. DR 实时成像技术在双面埋弧焊管焊缝检测中的应用[J]. 焊管, 2010, 33(02):17-20.
- [7] 巨西民, 蒋中印, 兰川, 等. 埋弧焊钢管焊缝 DR 检测机理及应用[J]. 无损检测, 2014, 36(10):29-31+77.
- [8] 姚阳明. 分析射线数字成像检测(DR)技术在管道对接焊缝检测中的应用[J]. 低碳世界, 2020, 10(06):217+219.
- [9] 雷铮强, 王维斌, 温玉芬, 等. 长输管道环焊缝的射线数字成像检测技术应用[J]. 管道技术与设备, 2021, 167(01):52-54+57.
- [10] 胡庆仰. X 线数字成像技术在埋弧焊管焊缝检测中的应用[J]. 海峡科技与产业, 2020(04):38-40.
- [11] 刘伟, 闵宇谦, 兰清生, 等. 聚乙烯燃气管道电熔对接接头的数字射线检测[J]. 工业技术创新, 2019, 6(05):64-67.
- [12] Hardy M, Harvey H. Artificial intelligence in diagnostic imaging: impact on the radiography profession[J]. British Journal of Radiology, 2020, 93(1108):20190840.
- [13] Baniukiewicz P. Automated defect recognition and identification in digital radiography[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33:327-334.

作者简介: 蔡宇(1981.01-), 男, 汉族, 四川成都人, 本科, 工程师, 研究方向: 特种设备检验及相关无损检测。

