

X射线数字成像在压力容器焊缝无损检测中的应用与优化

蔡福磊, 朱涛平

江联重工集团股份有限公司, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/ME.2025040011

摘 要 : 随着工业装备向高安全、高可靠性方向发展, 压力容器焊缝质量的无损检测显得尤为重要。X射线数字成像技术作为传统射线检测的升级方案, 凭借高分辨率、实时成像和数字化处理优势, 逐渐成为焊缝无损检测的主流手段。本文系统介绍了X射线数字成像技术的原理及设备构成, 结合压力容器焊缝的缺陷类型和检测需求, 分析了该技术的应用实践和优势。重点探讨了当前应用中存在的技术瓶颈及优化策略, 并展望了未来智能化、标准化的发展趋势。研究表明, X射线数字成像技术的推广应用, 有助于提升压力容器焊缝检测的效率和准确性, 保障设备运行安全。

关 键 词 : 压力容器; 焊缝检测; X射线数字成像; 无损检测; 技术优化

Application and Optimization of X-ray Digital Imaging in Non-destructive Testing of Pressure Vessel Welds

Cai Fulei, Zhu Taoping

Jianglian Heavy Industry Group Co., LTD., Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : With the development of industrial equipment towards higher safety and higher reliability, non-destructive testing of weld quality in pressure vessels has become particularly important. X-ray digital imaging technology, as an upgraded solution to traditional radiographic testing, has gradually become the mainstream method for non-destructive testing of welds, thanks to its advantages of high resolution, real-time imaging and digital processing. This paper systematically introduces the principle and equipment composition of X-ray digital imaging technology. Combined with the defect types and detection requirements of pressure vessel welds, it analyzes the application practice and advantages of this technology. The technical bottlenecks and optimization strategies existing in current applications were mainly discussed, and the future development trends of intelligence and standardization were also prospected. Research shows that the promotion and application of X-ray digital imaging technology can help improve the efficiency and accuracy of weld detection in pressure vessels and ensure the safe operation of equipment.

Keywords : pressure vessel; weld seam inspection; X-ray digital imaging; non-destructive testing; technical optimization

引言

对于压力容器来说, 作为重要的特种设备之一, 极容易导致爆炸或中毒等事故的发生, 所以开展其安全检测工作是非常有必要的。而针对于无损检测技术, 主要是指维护被检测对象, 由材料内部结构异常或缺陷的存在, 对一系列反应的变化加以利用, 如热、声、光等, 以此来对各种工程的材料、零部件、结构件内部等进行探测, 同时准确判断和评价缺陷的类型、性质、形状等, 以免严重损伤到材料与设备。本文将围绕X射线数字成像技术的基本原理、设备特点及其在压力容器焊缝检测中的应用实践展开, 结合典型案例分析技术效果, 深入剖析存在的问题及优化策略, 最后展望技术未来发展方向, 旨在为压力容器焊缝无损检测的技术进步与应用推广提供参考。

一、X射线数字成像技术概述

（一）数字成像的基本原理

X射线数字成像是利用电子成像技术代替传统胶片拍片的一种先进无损检测手段。其基本原理是：X射线穿透被检测工件后，根据不同材料或结构对X射线的吸收差异，在探测器上形成一幅灰度图像。该图像被采集、数字化，并通过图像处理软件进行增强与分析，从而识别材料内部的缺陷。

数字成像技术主要分为三类：计算机射线成像、直接数字成像和X射线计算机断层扫描成像。其中，CR利用成像板暂存图像后经扫描读取图像，适用于需要便携操作的现场检测；DR直接通过平板探测器实时输出数字图像，具有响应速度快、图像质量高的优点，适合工业在线检测；CT则通过多角度投影重建出三维图像，适用于对复杂结构缺陷的精确分析，但设备成本高、扫描时间长。

（二）技术设备与关键参数

X射线数字成像系统通常由三部分组成：X射线源、数字探测器以及图像处理系统。X射线源产生一定能量范围内的射线束，用以穿透工件并在探测器上形成图像。常用X射线管电压范围在100~450kV之间，具体根据工件材质与厚度选择。数字探测器包括非晶硅平板探测器、CMOS传感器等，是决定图像分辨率与成像质量的核心组件。图像处理系统负责图像采集、增强、滤波、缺陷识别与数据管理，可与人工智能算法结合实现自动评估。

（三）与传统射线检测的对比分析

与传统胶片射线检测相比，X射线数字成像技术在多个方面具有明显优势。首先，在成像效率方面，数字成像技术可实现图像实时显示与快速分析，省去了胶片冲洗、干燥等繁琐过程，大幅提高了检测速度，特别适合批量检测与在线监控应用。

在缺陷识别能力方面，数字图像可以通过增强处理、伪彩显示、边缘锐化等手段，明显提升缺陷的可见度与对比度。数字系统还可记录历史图像、进行图像叠加比对与自动缺陷识别分析，提高分析的客观性与准确性。

二、压力容器焊缝的检测需求与缺陷类型

（一）焊缝常见缺陷类型

焊缝是压力容器结构中最易产生应力集中的部位，其质量直接影响设备的密封性与承压能力。在焊接过程中，由于热输入、工艺参数、材料性能或操作不当等因素，容易产生各种形式的缺陷。X射线数字成像技术作为无损检测手段，主要针对以下几类焊接缺陷进行识别和评估：

（1）气孔：在焊接过程中，由于气体未能及时逸出，在焊缝金属中形成球形或椭圆形的空洞。气孔会降低焊缝的强度和致密性，是最常见的表面或近表面缺陷类型。

（2）未焊透：指在焊缝根部未能形成有效熔合，是一种危害性极大的结构性缺陷，容易导致承压过程中发生裂纹扩展或断裂。

（3）夹渣：由于焊渣未能完全排出，留存在焊缝内部形成不连续的夹杂物，通常呈条状或块状分布，影响焊缝的金属连续性。

（4）裂纹：包括冷裂纹、热裂纹和延迟裂纹等，通常与焊

接热循环、应力集中和冶金缺陷有关。裂纹是焊接中最危险的缺陷，往往会迅速扩展，导致压力容器突然失效。

（5）咬边与焊缝不规则成型：这些表面缺陷虽不如内部缺陷危险，但会影响焊缝的力学性能，并可能成为腐蚀源点。

（二）对检测技术的具体要求

（1）高分辨率成像能力：能够识别1mm以下的微小缺陷，尤其是在高压、厚壁容器中，对探测深度与成像细节的要求更高。X射线数字成像因其灰度分辨率高、图像对比度好，可满足这类高精度需求。

（2）高可靠性与重复性：检测结果应具备高度的一致性，避免因操作人员经验不同而产生差异性判读。数字化系统配合AI辅助识别技术，可有效降低主观干扰。

（3）实时成像与快速评估：为适应工程项目进度，检测系统应具备实时图像显示与快速处理能力，减少等待与重复检测时间。

（4）良好的可追溯性与图像归档功能：数字图像可存储、备份、远程调阅，支持缺陷历史比对和数据溯源，有利于长期安全监测与技术复核。

（5）现场适应能力强：现场检测往往存在环境温差、光线干扰、电磁干扰等问题，设备需具备良好的抗干扰性能与便携性，特别是在空间狭小或焊缝分布复杂的情况下。

三、X射线数字成像在焊缝检测中的应用实践

（一）应用流程与技术方法

在压力容器焊缝无损检测实际操作中，X射线数字成像的应用流程通常包括检测方案制定、设备布置、参数设置、图像采集与处理、缺陷评估与记录等环节。

根据压力容器的结构、壁厚、材质和焊缝类型制定个性化检测方案，包括选择适宜的X射线管电压、电流、曝光时间、射线入射角度等参数。对于焊缝部位复杂或有结构遮挡的情况，还需采用双面曝光、多角度成像等技术手段，以全面覆盖检测区域。

在图像采集过程中，数字探测器（如平板成像系统）实时接收透射X射线形成的图像数据，并通过高速图像处理系统完成自动增强、边缘提取、图像去噪等处理操作。相比传统胶片拍片，数字成像不仅成像时间大幅缩短，而且图像更清晰、对比度更高，利于细微缺陷的识别。

对于成像后的图像数据，检测人员结合国家标准对图像中灰阶分布、结构边界、异常区域等进行定性分析，并可借助AI图像识别系统自动标注可能的缺陷类型与位置，实现快速判断与精准定位。同时，检测图像可自动归档，支持图像历史比对与远程专家会诊。

（二）典型检测案例分析

某石化企业对一批Φ1600mm、壁厚22mm的中压换热器压力容器进行出厂前焊缝检测。为确保检测覆盖率与图像分辨率，项目选用了320kVX射线机和非晶硅平板探测器进行DR检测。

检测流程如下：

检测方案设定：根据NB/T47013标准，确定以纵缝和环缝为重点区域，采用S形曝光布置，实现无死角覆盖；

曝光参数设置：电压320kV、电流3.2mA，曝光时间3.8秒，

单次成像面积为 400mm×400mm；

图像分析：使用图像处理软件进行锐化与对比度调整，AI 系统识别出数处低密度气孔和一处疑似夹渣缺陷；

人工复核：由三级检测人员复查并确认缺陷等级，最终判定符合三级评定标准，返修后复检通过。

（三）应用效果评估

通过实际工程应用与长期追踪，X 射线数字成像在压力容器焊缝检测中的优势表现如下：

1. 检测效率大幅提升

数字成像过程自动化程度高，免去传统拍片、冲洗、干燥等繁杂工序，极大缩短了检测周期。在大批量、多批次容器检测中尤为显著，可节省至少 40% 的时间成本。

2. 缺陷识别率明显提高

数字图像具备更高的对比度和分辨率，特别是对气孔、夹渣、未焊透等中小型缺陷表现敏感。辅以图像处理技术，提升了缺陷识别的精确性与稳定性。

3. 作业环境更安全

在剂量控制和远程操作方面，数字系统大幅减少了人员暴露在辐射环境中的时间和强度，符合职业健康安全管理标准，提升了检测人员的职业安全保障。

4. 数据管理现代化

检测图像可数字化归档、远程传输、信息化管理，有利于形成检测数据库和进行质量追踪分析，为容器全生命周期管理提供依据。

四、存在问题与优化策略

（一）当前应用中存在的技术问题

1. 图像噪声与伪影干扰

在实际成像过程中，受散射射线干扰、设备校准误差或探测器灵敏度不均匀等因素影响，容易在图像中出现伪影、噪点或模糊区域。这些干扰会导致缺陷识别误判、漏判，特别是在高密度材料或结构复杂部位更为明显。

2. 检测死角与盲区问题

在检测大型压力容器环缝或异型结构部位时，受制于空间限制和射线入射角度，部分区域存在覆盖盲区。此类死角若无法有效覆盖，将可能遗漏关键焊缝缺陷，影响整体验收质量。

3. 图像识别依赖人工主观判断

尽管数字图像清晰度高，但当前多数检测单位仍依赖人工阅片。由于检测人员经验差异，容易出现判断标准不一致的问题，影响检测结果的稳定性与权威性。AI 图像识别技术虽然初见成效，但识别准确率、泛化能力和标准匹配度仍待提升。

4. 标准化操作流程缺失

不同检测单位在曝光参数选择、图像处理软件使用、评片标

准执行等方面存在较大差异，缺乏统一标准，导致检测质量和效率存在波动，制约了技术的推广应用。

（二）检测系统优化方向

1. 提升探测器性能与图像算法质量

应采用高动态范围、高分辨率的非晶硅平板探测器，增强图像灰阶对比能力，减少模糊和伪影。此外，应引入自适应滤波、图像复原与边缘增强等算法，提高缺陷区域的清晰度与轮廓识别能力。

2. 发展 AI 辅助识别系统

基于深度学习的缺陷识别模型可实现自动检测、分类与标注，降低人工负担，提升识别标准一致性。结合大样本焊缝缺陷图像库进行模型训练与优化，逐步实现自动阅片、辅助诊断与智能评估。

3. 引入多角度成像与结构建模技术

对复杂结构容器应采用多角度成像技术或三维结构建模，通过角度叠加、图像合成等手段消除盲区影响，增强对异型部位缺陷的检测能力。

4. 推动标准体系建设与流程规范化

应推动制定数字成像在压力容器检测领域的统一操作标准，明确从拍片参数、图像处理、缺陷评估到数据归档的全流程要求。通过标准化作业流程，提升技术适应性与工程落地性。

（三）检测系统优化方向

1. 人员培训机制优化

应建立健全的培训认证体系，加强对检测人员在数字成像设备操作、图像分析、标准判读等方面的系统培训，确保其具备专业技术能力与质量判断能力。

2. 构建数字化检测管理平台

通过构建图像数据库、检测日志、设备维护记录与缺陷评估报告一体化管理系统，实现检测过程全程可追溯、结果可回查、质量可量化，推动检测数据的积累与分析应用。

3. 融合多种无损检测技术形成互补优势

将 X 射线数字成像与超声检测（UT）、相控阵（PAUT）、声发射（AE）等技术联合应用，实现缺陷探测的互证互补，提升整体检测精度和可靠性。多手段融合还可在复杂结构、高风险部位提供更立体化的安全保障。

五、结束语

X 射线数字成像技术作为压力容器焊缝无损检测的重要手段，凭借其高效、精准和数字化的特点，极大提升了焊缝缺陷识别的准确率和检测效率，推动了传统检测技术的革新。然而，当前技术在图像质量控制、盲区覆盖、智能识别以及标准化操作等方面仍存在不足，亟需通过探测器性能提升、人工智能辅助诊断、多角度成像及流程规范化等多维度优化加以解决。

参考文献

- [1] 张立新. 无损检测中焊缝 X 射线底片数字化仪及焊缝图像缺陷检测识别系统 [J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(02): 1.
- [2] 孙福成, 王伟波, 张志强, 等. 窄间隙热丝 TIG 焊在反应堆压力容器上的应用及质量控制研究 [J]. 电焊机, 2019, 49(04): 5.
- [3] 冯云国, 李圣争, 陈聪. 数字射线检测参数对管母线群孔成像质量的影响 [J]. 山东电力技术, 2019, 46(10): 4.
- [4] 王磊, 郑连学, 陈中荣, 等. 球罐对接焊缝中裂纹、夹渣相控阵识谱技术探讨 [J]. 压力容器, 2019, 36(06): 7.
- [5] 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): 4.