

在役石油化工压力管道承压设备射线检测中的 工艺优化选择

刘有艳

(江苏省特种设备安全监督检验研究院扬州分院, 扬州市化工设备安全检验中心, 江苏 扬州 225000)

摘要: 射线检测是在役石油化工压力管道及承压设备检测中的重要无损检测方法。针对目前检测工艺选择存在盲目性、优化程度不足、适应性差等问题, 本文从管道设备自身特点、检测环境限制、仪器设备性能等角度, 分析了影响射线检测工艺优化选择的关键因素。在此基础上, 提出了建立工艺优化选择指标体系、开展典型缺陷工艺对比试验、制定分类分级工艺选择方案、构建工艺优化选择数据库与智能平台等策略, 以期在役石油化工压力管道承压设备射线检测的工艺优化选择提供参考。

关键词: 在役石油化工压力管道; 承压设备; 射线检测

0 引言

石油化工生产过程中, 压力管道及承压设备长期服役在高温高压、腐蚀磨损等恶劣工况下, 容易产生断裂、泄露等失效, 给安全生产和环境保护带来严重隐患。及时、准确地评估在役压力管道承压设备的完整性和可靠性, 对于保障石油化工装置的安全平稳运行至关重要。射线检测凭借其直观、灵敏、适应性强等优势, 在压力管道承压设备检测中得到广泛应用。然而, 由于被检对象结构形式多样、缺陷类型复杂, 射线检测工艺参数选择和优化匹配的合理性直接决定了检测结果的可靠性。因此, 如何从众多射线检测工艺中优选出最佳方案, 成为亟待解决的关键问题。

1 在役石油化工压力管道承压设备射线检测工艺现状及存在的问题

1.1 常用射线检测工艺介绍

射线检测主要利用 X 射线或 γ 射线对被检工件进行透照成像, 根据图像中的缺陷信息判断工件的内部质量。按成像方式可分为射线胶片照相检测、射线探伤仪实时成像检测、数字化射线成像检测 (DR) 和计算机断层扫描成像检测 (CT) 等。各类工艺在射线源类型及能量、灵敏度、分辨率、成像效率等方面存在显著差异。例如, 射线胶片照相分辨率较高, 但成像和判读耗时长; 射线探伤仪实时成像速度快, 但灵敏度偏低; DR 成像在效率和灵敏度方面具有综合优势; CT 断层成像可获得工件的三维内部结构, 但扫描和重建时间长。

1.2 不同检测工艺的特点对比

在实际检测中, 射线胶片照相常用于焊缝质量检测, 尤其适用于对成像质量要求较高但效率要求不高的工况。射线探伤仪可快速判断管道泄露或堵塞情况, 适合对成像效率要求高但对缺陷分辨率要求不高的情况。DR 在管道焊缝缺陷和腐蚀检测中具有良好的综合性能, 能够兼顾成像质量与检测效率。CT 虽然设备复杂、效率较低, 但对复杂结构内部的缺陷检出能力突出, 在承压设备局部区域的精细检测中独具优势。因此, 射线检测工艺的选择需要综合考虑被检对象特点、缺陷类型、检测效率等多方面因素。

1.3 目前检测工艺选择中存在的问题

当前, 在役石油化工压力管道承压设备射线检测工艺的选择还不够科学合理, 主要问题体现在以下三个方面: 一是工艺选择的盲目性, 缺乏针对不同检测对象特点的系统分析和试验论证; 二是工艺优化程度不够, 射线能量、曝光时间等关键参数的选取缺乏定量依据, 难以发挥设备性能的最佳效果; 三是检测工艺的适应性有待提高, 对于一些特殊材质、复杂结构和高难度工况的检测, 缺乏专门的工艺方案。这些问题制约了射线检测技术在石油化工领域的进一步推广应用。

2 影响在役石油化工压力管道承压设备射线检测工艺优化选择的因素分析

2.1 管道及设备自身因素

被检测的压力管道及承压设备的自身特点是影响射线检测工艺选择的首要因素。一方面, 不同类型管

道和设备的几何形状、尺寸范围差异很大,如管道有直管、弯管,设备有球罐、塔器等,对射线能量、照射角度、成像距离等参数的要求各不相同。另一方面,管道和设备所用材料的种类、厚度、复合情况多种多样,对射线的穿透能力和成像质量有很大影响。此外,服役管道及设备的缺陷类型、尺寸、分布位置也呈现多样化特点。常见的有焊接缺陷、腐蚀减薄、裂纹、变形等,不同缺陷的检出对射线成像的分辨率和灵敏度要求不尽相同。因此,射线检测工艺方案的制定需要充分考虑被检对象的结构、材质、缺陷特点等因素。

2.2 检测环境因素

在役管道及压力容器的检测现场环境对射线检测的工艺选择和参数优化至关重要。石油化工装置普遍存在检测空间狭小、周围障碍物多等问题,射线源布置和成像设备安装受到很大限制。管道焊缝内外表面、承压设备内部等特殊部位的检测尤其困难,常规工艺难以满足要求。同时,高温、潮湿等恶劣环境条件会影响胶片成像质量或数字成像系统的稳定性,因此射线检测工艺还需考虑耐环境干扰的性能。石油化工生产区域的射线防护要求非常严格,需要加装铅屏蔽或选用方向性准直较好的射线源,也对工艺参数的优化提出了更高要求。

2.3 检测仪器设备因素

X射线机、 γ 射线源等射线发生装置的性能参数对检测效果有直接影响。射线源类型的选择需要兼顾穿透能力和方向分辨率。例如,X射线在较薄的钢板检测时穿透能力佳,而 γ 射线在厚钢板及双层介质检测中具有优势。此外,射线源能量越高,穿透能力越强,但散射增加会降低图像质量。数字平板探测器、CT扫描成像系统等成像设备的空间分辨率、灵敏度、动态范围、信噪比等指标也是影响射线成像质量的关键因素。先进的图像处理算法如多帧平均、感兴趣区域优化等,可显著降低图像噪声、提高缺陷识别能力。

3 在役石油化工压力管道承压设备射线检测工艺优化选择策略

3.1 建立工艺优化选择指标体系

科学合理的射线检测工艺优化选择离不开系统的指标评价体系。检测效率、图像质量、射线防护、成本效益等是评价工艺方案优劣的重要指标。应针对不同类型管道设备,建立涵盖检测灵敏度、缺陷分辨率、检测速度、射线剂量率、造价成本等定量化指标,形成标准化的工艺评价流程。例如,对于壁厚较薄的管道焊缝,应重点关注焊缝缺陷的分辨率,选择X射线

胶片照相或数字成像DR技术,优化射线能量、焦点尺寸、照射时间等参数;而对于厚壁压力容器,则应更加关注射线能量对缺陷检测灵敏度的影响,选择 γ 射线源或高能X射线源,在满足成像质量的前提下兼顾射线防护的要求。通过多指标综合权衡,建立各工艺方案的综合评分标准,形成工艺评价矩阵,为工艺优化选择提供客观依据。评价指标的量化和评分权重的合理设置需要大量试验数据的支撑和专家经验的指导。

同时,工艺优化选择指标体系的建立还应兼顾一些重要的定性指标。例如,工艺方案现场实施的便捷性直接影响检测效率,应优选布置灵活、机动性强的射线源和成像设备;检测过程的可视化和结果的可追溯性对于事后质量评价、安全责任认定至关重要,应优先选择数字化程度较高、具备图像留存和缺陷标注功能的无损检测设备。

3.2 开展典型缺陷工艺对比试验

在役管道设备检测中常见的断裂、泄露、腐蚀等失效形式,对应着疲劳裂纹、焊接气孔、腐蚀坑等多种缺陷类型。工艺优化选择需要在充分试验对比的基础上,建立各种缺陷、工艺参数与检测结果的量化关联。应选取有代表性的典型缺陷,如管道环焊缝未熔合、压力容器筒体焊缝夹渣、管道弯头处应力腐蚀开裂、承压设备内表面点蚀等,针对胶片照相、DR成像、CT三维成像等不同射线检测工艺,在相同条件下开展对比试验。

以管道环焊缝未熔合缺陷为例,可针对壁厚范围、焊缝材料、缺陷尺寸分布等因素,制备一批缺陷标准试块。在优化曝光方式的基础上,采用多种工艺参数组合(如射线源类型、管电压/源活度、曝光时间、焦点尺寸、像源距、成像参数等)分别成像,获得大量图像数据。采用目视或软件分析的方法,统计各工艺方案检出缺陷的数量、尺寸、检出率等指标,计算漏检率、虚警率、信噪比、灰度分辨率等定量化评价指标。在缺陷检测效果、成像质量、检测效率等方面对各工艺进行综合评判,筛选出适用于该缺陷的最优工艺参数组合。在对比试验基础上,还可进一步优化射线能量、滤线、成像曝光参数等,在统计规律性的基础上建立“缺陷—工艺—结果”的关联模型,用于工艺选择的定量评估。

3.3 制定分类分级工艺选择方案

石油化工生产装置纷繁复杂,管道及压力容器种类繁多,不同工况、不同材质、不同结构形式对射线检测工艺的适用性差异很大。对在役设备进行科学分

类分级,制定有针对性的射线检测工艺方案,是提高工艺选择精准性、规范性的必由之路。可从设备类型、材质特征、使用工况、风险等级等不同维度对管道及压力容器进行系统梳理,形成三级分类体系,并在各分类单元内部根据对射线检测工艺要求的差异性划分不同的检测难度等级。

在此基础上,制定不同检测对象的射线检测标准工艺流程,包括适用的射线源类型、探测器性能要求、最佳射线能量范围、最小成像时间、图像质量判据、缺陷分级判废标准等,形成设备分类射线检测工艺指南,为工艺选择提供可操作的依据。标准工艺方案并非一成不变。对于新材料、新结构形式的压力管道或容器,在标准工艺的框架内灵活调整射线能量、照射时间等关键参数,形成适用于特定设备特征的子方案,可有效提高工艺选择的适应性和精准性。

3.4 建立工艺优化选择数据库与智能平台

工艺优化选择的研究成果和应用经验需要系统化积累和智能化利用。建立石油石化行业射线检测工艺参数数据库,是实现工艺优化选择科学化、规范化的关键举措。工艺参数数据库可通过两种途径获取素材:一是总结归纳国内外同行在各种缺陷、材质、结构等情况下的成功工艺经验和失败教训,凝练出适用面较广的“最佳实践”参数模板;二是在前述对比试验基础上,将“缺陷—工艺—结果”数据通过合理筛选纳入库中,使数据库在动态积累中日臻完善、不断升级。工艺参数与检测效能之间往往存在较强的非线性关联,采用大数据关联分析、机器学习等智能算法,可以从海量工艺数据中挖掘各参数与检测结果的内在规律,建立多参数动态优化模型,对工艺选择起到科学指导作用。

然而,射线检测的工艺选择不能完全依赖“算法优化”。一方面,工艺经验知识的获取离不开人的参与,优秀工艺专家的经验直觉对工艺优化至关重要;另一方面,复杂工况下的检测工艺需要因地制宜,专家对现场环境的把控能力是不可或缺的。因此,有必要开发工艺优化选择智能决策系统,将专家经验知识、工艺优化算法与数据库有机融合。系统的推理机制可设定为:首先匹配标准工艺方案库,若无合适方案,则转入特定材质、缺陷、结构工况下的专项工艺方案匹配;若仍不能满足,则提示用户采用定制优化功能,选取相近工况,在知识库中智能检索、交互优化,必要时通过远程通讯,接入行业专家智库予以在线指导,量

身定制出满足特定需求的检测工艺方案。

3.5 合理选择射线源与能量

在役石化承压设备在运作时,最让人担忧的问题之一便是表面缺损的产生,像是出现裂缝这类问题。

据此,在役石化行业重压容器的射线探伤操作应运而生,一旦X射线机与 γ 射线源均处于可用状态,优先选择X射线机进行检测。根据射线探伤的相关理论,我们可以明了射线胶片的成像质量会由多种元素所影响,包括但不限于对比度、模糊度和颗粒度等方面的因素。大多数承压设备在执行X射线检测时,都能够取得更佳的颗粒度表现、对比度和图像清晰度,采取这种方法可有效识别裂缝等面积性缺损,极大提高了发现这类缺陷的概率。

在选拔X射线能级时须慎重,在确保具备充足渗透性的前提下,应当挑选能量偏低的X射线。能量若偏低,则胶片的深色程度难以维持,同时雾度偏高会对探测的灵敏性产生负面影响。另一方面,若能量偏高,对比度随之降低,图像的模糊度和胶片粒子度会增加,使得灵敏度得不到有效保证。因此,务必优先选用低能级的X光线,以确保对微小裂缝等缺陷进行精确的识别,从而有利于裂纹等问题的充分解决,并确保石化行业压力容器的稳定运作。

4 结语

在役石油化工压力管道及承压设备的射线检测对保障装置安全、降低事故风险至关重要。但由于被检对象结构性能、缺陷特点差异较大,检测环境复杂多变,传统的“经验式”工艺选择方法难以适应日益提高的检测质量和效率要求。因此,深入分析影响射线检测工艺优化选择的关键因素,从标准规范、试验论证、分类指导、数据积累、智能优化等多方面入手,形成一套行之有效的工艺优化选择策略和方法,对于提升在役石油化工压力管道承压设备射线检测的科学性、规范性和适用性,具有重要的理论意义和实践价值。

参考文献:

- [1] 石美真,许子豪,赵建如.石油化工用压力管道的无损检测技术应用研究[J].锅炉制造,2024,(03):53-54+57.
- [2] 路明博.石油化工压力管道安装工艺及质量控制重点的研究[J].新疆有色金属,2024,47(02):103-104.

作者简介:

刘有艳(1986-)女,汉族,山东临沂人,硕士研究生,工程师,研究方向,特种设备检验检测。