

# 射线检测在石油化工管道缺陷识别中的应用优化

齐 成

山东泰思特检测有限公司 山东 淄博 255400

**摘要:** 石油化工行业作为国家能源与化工产业的重要支柱,其生产系统的安全稳定运行至关重要。管道系统作为物料输送的核心载体,长期处于高温、高压、腐蚀性介质等严苛工况下,极易产生裂纹、腐蚀、未熔合、气孔等缺陷,严重威胁装置安全。射线检测(Radiographic Testing, RT)作为无损检测(NDT)技术中的经典方法,凭借其直观成像、永久记录、对体积型缺陷敏感等优势,在石油化工管道缺陷识别中占据重要地位。然而,传统射线检测在效率、安全性、图像质量及缺陷识别精度等方面仍面临诸多挑战。本文系统梳理了射线检测在石油化工管道中的典型应用场景与技术原理,深入分析了当前应用中存在的主要问题,并从检测工艺优化、数字成像技术升级、人工智能辅助判读、安全防护体系完善及多技术融合等维度,提出了系统性的优化策略。研究表明,通过引入数字射线成像(DR)、计算机射线成像(CR)及人工智能(AI)算法,结合标准化作业流程与风险评估机制,可显著提升射线检测的准确性、效率与安全性,为石油化工管道全生命周期安全管理提供有力技术支撑。

**关键词:** 射线检测; 石油化工管道; 缺陷识别; 数字成像; 人工智能; 无损检测

## 引言

石油化工装置工艺管道众多,服役中受介质腐蚀等因素影响会产生缺陷,若未及时处理,微小缺陷可能引发重大安全事故,造成严重后果。因此,对管道实施高效精准无损检测是保障石化装置安全的关键。射线检测能提供直观二维投影图像,清晰显示焊缝内部结构与缺陷形态,检测结果可长期保存,对体积型缺陷有不可替代的优势,被广泛应用于压力管道检验。但随着石化装置发展,传统胶片射线检测在效率、安全等方面显现局限性。近年来,数字射线成像等数字技术成熟,人工智能在图像识别领域取得突破,为射线检测革新提供新路径。如何融合先进技术与检测需求,构建高效智能安全的检测体系是行业关键课题。本文将探讨射线检测应用现状、问题,并提出优化策略。

## 1 射线检测技术原理及在石化管道中的应用

### 1.1 技术原理

射线检测的基本原理是利用X射线或 $\gamma$ 射线穿透被检物体,由于物体内部不同部位(如金属基体与缺陷)对射线的吸收系数不同,导致穿透后的射线强度产生差异<sup>[1]</sup>。这些强度差异被记录介质(胶片、成像板或数字探测器)捕获,经处理后形成影像,即射线底片或数字图像。在图像中,缺陷区域因吸收射线较少而呈现较暗(胶片)或较高灰度值(数字图像),从而实现对内部缺陷的可视化识别。在石化管道检测中,主要关注焊缝区域。常见的缺陷类型包括:(1)体积型缺陷:气孔、夹渣、缩孔等,RT对此类缺陷检出率高。(2)面积型缺

陷:裂纹、未熔合、未焊透等,其检出率受缺陷取向、射线角度影响较大。

### 1.2 典型应用场景

(1)新建管道安装质量验收:在管道焊接完成后,依据ASME B31.3、GB/T20801等标准,对关键焊缝进行100%或抽检RT,确保焊接质量符合设计要求。(2)在役管道定期检验:根据《压力管道定期检验规则》,对运行中的管道进行周期性RT抽查,重点监控高风险区域(如弯头、三通、焊缝热影响区)的腐蚀减薄、应力腐蚀开裂等。(3)事故后或改造前评估:在管道发生泄漏或计划进行改造、升级前,通过RT对可疑区域进行全面检测,为维修决策提供依据。

## 2 当前应用中存在的主要问题

尽管射线检测应用广泛,但在实际操作中仍面临诸多挑战:

### 2.1 检测效率低下

传统胶片RT流程繁琐,包括布片、曝光、暗室冲洗、干燥、评片等多个环节,单次检测耗时长。在大型石化装置中,面对海量焊缝,检测周期长,难以满足快速检修的需求。

### 2.2 辐射安全风险高

射线源(尤其是高活度的Ir-192、Se-75等 $\gamma$ 源)的使用存在固有辐射风险。在空间受限、人员密集的石化厂区内进行RT作业,隔离区域设置困难,易对周边作业人员及环境构成潜在威胁。安全防护成本高,管理难度大。

### 2.3 图像质量与判读主观性

胶片RT的图像质量受胶片类型、增感屏、曝光参数、暗室处理等多种因素影响,稳定性差。评片工作高度依赖检测人员的经验和主观判断,易出现漏检、误判,检测结果的一致性和可重复性难以保证。

#### 2.4 对面积型缺陷检出能力有限

对于与射线束方向平行的裂纹、未熔合等面积型缺陷,由于其厚度方向尺寸极小,射线穿透时衰减差异不明显,在图像上难以分辨,导致检出率偏低。

#### 2.5 数据管理与追溯困难

胶片作为物理介质,存储、检索、共享不便,且易受潮、老化、划伤,影响长期追溯性。在数字化管理趋势下,胶片数据难以与企业信息化系统(如设备完整性管理系统)有效集成。

### 3 射线检测应用优化策略

#### 3.1 推广数字成像技术(CR/DR)替代传统胶片

数字成像技术的引入是射线检测现代化转型的核心。计算机射线成像(CR)通过使用可重复使用的成像板(IP板)替代一次性胶片,经激光扫描后将潜影信息转化为数字图像,既保留了传统胶片良好的几何不清晰度特性,又彻底摆脱了暗室处理的束缚,实现了图像的即时获取与数字化存储。而数字射线成像(DR)则更进一步,采用平板探测器(FPD)直接将X射线信号转换为数字信号,实现“所见即所得”的实时成像,检测效率得到革命性提升。数字成像技术的推广带来了多重效益<sup>[2]</sup>。一方面,检测周期大幅缩短,单次检测从数小时压缩至数十分钟,显著提升了在役检验的响应速度;另一方面,数字图像具有宽动态范围和高信噪比,可通过软件进行对比度调整、边缘增强、噪声抑制等后处理操作,有效突出微弱缺陷特征,提升图像解读的可靠性。更重要的是,所有检测数据以标准数字格式(如DICOM)存储,便于建立电子档案库,实现远程调阅、专家会诊和与企业设备管理系统的无缝集成,为数据驱动的完整性管理奠定基础。

#### 3.2 构建基于人工智能(AI)的智能评片系统

人工智能,特别是深度学习技术,为解决评片主观性难题提供了全新思路。通过构建大规模、高质量、标注精准的石化管道焊缝缺陷图像数据库,并利用卷积神经网络(CNN)等先进算法进行训练,可以开发出能够自动识别、定位和分类缺陷的智能评片模型。这些模型在学习了海量样本后,能够捕捉到人眼难以察觉的细微纹理和灰度变化模式,对气孔、夹渣、未熔合等典型缺陷具备较高的识别准确率。将训练成熟的AI模型嵌入到DR/CR工作站或云端平台,可实现对新采集图像的自动

初筛。系统能快速标记出所有可疑区域,并给出置信度评分,检测人员只需对高置信度区域进行复核确认,从而将工作重心从繁重的“大海捞针”式筛查转移到精准的“重点复核”上。这不仅大幅提升了工作效率,也显著降低了因疲劳或经验不足导致的漏检、误判风险,使检测结果更加客观、一致和可追溯。

#### 3.3 优化检测工艺与作业流程

在技术升级的同时,检测工艺与作业流程的精细化管理同样关键。应摒弃“经验主义”的曝光参数设定方式,转而采用基于物理模型或数据库的精准计算方法,针对不同管径、壁厚、材质组合,预先模拟并确定最优的X射线能量、电流与曝光时间,确保一次成像即达到标准要求的图像质量,减少反复试片造成的资源浪费和工期延误。对于高风险区域或对面积型缺陷高度敏感的场所,应推广多角度、多视角成像策略。例如,对环焊缝采用双壁双影法,从两个相互垂直的方向进行曝光,可有效克服单一视角下裂纹“隐身”的问题<sup>[3]</sup>。同时,必须建立并严格执行标准化作业程序(SOP),对从现场准备、设备架设、图像采集、数据传输到最终评片与报告出具的每一个环节进行规范,确保检测过程的可控性和结果的可比性,这是实现高质量、高效率检测的制度保障。

#### 3.4 强化辐射安全防护与管理

安全是射线检测的生命线。优化工作必须将辐射防护置于首位。数字成像技术本身通常具有更高的探测效率,这意味着在获得同等图像质量的前提下,所需的辐射剂量显著低于传统胶片法,从源头上降低了风险。此外,应积极推广便携式乃至爬行式DR设备的应用。对于长直管段,可将X射线源与探测器集成于管道爬行器上,从管道内部进行检测,从而将辐射场完全限制在管道内部,外部几乎无需设置隔离区,极大地提升了在复杂厂区作业的安全性与可行性。在管理层面,应建立智能化的辐射监控体系。在作业区域周边部署联网的实时剂量监测仪,数据同步至中央控制室,一旦监测值接近或超过预设阈值,系统自动触发声光报警并联动切断射线源,形成双重保险。同时,必须强化人员资质管理与安全培训,确保所有RT作业人员持证上岗,并定期接受辐射防护知识更新与应急处置演练,从“人、机、料、法、环”全方位筑牢安全防线。

#### 3.5 推动多技术融合互补

必须清醒认识到,没有任何一种无损检测技术是万能的。射线检测的优势在于对体积型缺陷的直观成像,但其对面积型缺陷的敏感性不足。因此,最优策略是推动多技术融合,取长补短。超声检测(UT),特别是相

控阵超声 (PAUT), 对裂纹、未熔合等面积型缺陷具有极高的灵敏度和精确的定量能力, 可与RT形成完美互补<sup>[4]</sup>。在实际应用中, 可先用RT进行大面积筛查, 对发现的可疑区域或高风险焊缝, 再辅以PAUT进行精确测长、测深和走向分析。此外, 导波检测 (GW) 技术擅长对长距离管道进行快速普查, 能高效定位壁厚异常或结构变化区域。将导波作为“侦察兵”, RT/UT作为“精锐部队”, 可构建“先普查、后精查”的高效检测流程, 既保证了覆盖范围, 又聚焦了检测资源, 显著提升了整体检测的经济性与有效性。这种多技术协同的综合检测理念, 代表了未来无损检测的发展方向。

#### 4 应用案例分析

某大型炼化一体化企业对其常减压装置的高温重油管线进行定期检验。该管材质为1Cr5Mo, 运行温度高达350℃, 长期受环烷酸腐蚀影响, 存在严重的局部壁厚减薄风险。若采用传统方案, 需使用Ir-192 $\gamma$ 源对计划中的200道焊缝进行胶片射线检测, 预计耗时长达4周, 并需设置覆盖整个管廊区域的大型辐射隔离区, 将严重干扰周边装置的正常生产。该企业最终采纳了一套优化后的综合检测方案。首先, 利用导波技术对整条管线进行快速普查, 高效筛选出15处存在明显壁厚异常的管段。随后, 仅针对这15处异常点及其相连的30道焊缝, 采用便携式X射线DR系统进行精准检测。所有采集的数字图像被实时上传至企业自建的云端AI评片平台, 系统在几分钟内完成了自动分析, 并标记出3处高度疑似未熔合的区域。检测人员随即对这些区域进行复核, 并调用相控阵超声设备进行验证, 最终确认其中2处为真实缺陷, 需安排计划性维修。整个优化方案的实施仅耗时5天, 辐射隔离范围缩小了80%以上, 不仅成功检出了关键缺陷, 避

免了潜在的非计划停工, 还最大限度地减少了对生产的影响。所有检测数据均以结构化数字形式归档, 并自动同步至企业的设备完整性管理系统, 为后续的风险评估与寿命预测提供了宝贵数据。这一案例生动诠释了技术融合与流程优化所带来的综合效益。

#### 5 结语

在数字化与智能化时代, 射线检测作为石油化工管道缺陷识别的传统手段, 通过技术融合重焕生机。本文提出的以数字成像为基础、人工智能为核心, 结合工艺优化等的系统性策略, 有效解决了传统RT在效率、安全等方面的难题。展望未来, 射线检测优化将向更深层次技术融合迈进。需提升AI模型泛化能力, 构建标准化数据库以训练普适性智能判读引擎; 三维成像技术或将在关键小口径管道部件检测中发挥重要作用; 射线检测数据将与管道数字孪生体深度融合, 实现实时映射与预测维护; 结合自主导航机器人, 全自动智能射线检测系统有望实现, 消除人工作业风险。持续创新优化, 射线检测将更关键、智能地保障管道安全与行业高质量发展。

#### 参考文献

- [1]陈庆良.射线检测技术在天然气管道内检测中的应用[J].西部特种设备,2024,7(03):15-19+36.
- [2]刘旭.长输管道施工焊接接头的射线检测验收标准探讨[J].山西冶金,2023,46(03):85-86+96.
- [3]吴乐.浅谈压力管道安装监检中射线检测的质量控制[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(18):41-43.
- [4]贾潇,赵隆.相控阵超声与射线检测对石油化工管道缺陷检测的对比分析[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(15):174-175+178.