

基于 X 射线数字成像技术的聚合釜内冷管泄漏故障分析

罗争光

湖南省特种设备检验检测研究院长沙分院, 湖南长沙, 410000;

摘要: 丙烯聚合反应是一种液相本体聚合反应, 聚合釜作为液相本体法聚丙烯生产的核心设备, 堪称聚丙烯装置的“心脏”。聚合釜的安全状况直接影响生产安全、企业效益与人员生命安全。传统检测手段在识别内冷管早期微裂纹方面存在不足, 难以满足现代化工设备的安全要求。随着 X 射线数字成像技术的发展, 其在高分辨率与无损检测方面展现出显著优势。旨在围绕聚合釜内冷管常见泄漏机理, 构建检测成像系统, 研究图像增强与裂纹识别方法, 旨在提升复杂结构中微缺陷的检出能力, 保障设备稳定安全运行。

关键词: 聚合釜内冷管; X 射线数字成像技术; 泄漏故障分析; 无损检测; 裂纹识别

DOI: 10.69979/3029-2727.25.08.022

1 聚合釜使用工况

丙烯聚合釜是聚丙烯生产的核心设备, 运行工况复杂苛刻。其内部充满液相、气相丙烯及聚丙烯粉料, 夹套通过循环冷却水控温, 长期在高温高压下运行, 工作压力可达 3.8MPa, 温度约 90℃。为提升换热效率和结构稳定性, 釜内设有 8 组径向 U 型内冷管, 采用上进上出的循环方式, 并在直管段加装折流板。然而, 设备运行中常经历周期性热负荷变化, 温度在 50~70℃ 间每小时循环一次, 同时壳体与管内压力在 3.5MPa 至 0.3MPa 间波动, 导致结构承受较大应力。某次运行中, 内冷管发生泄漏, 危及安全, 使用单位紧急停机排查, 凸显了对内冷管进行高效检测的重要性^[1]。

2 检测方法的选择

2.1 常用检测方法概述

在针对聚合釜内冷管泄漏位置的检测中, 常用的检测方法包括磁粉检测、渗透检测、射线检测、水压试验以及 X 射线数字成像等。这些方法各有优缺点, 但在聚合釜内冷管的检测中, 都存在一定的局限性。

2.2 磁粉检测

磁粉检测是一种传统的无损检测方法, 通过在被检测表面施加磁粉, 观察磁粉的吸附情况来判断是否存在裂纹或缺陷。然而, 由于聚合釜内部结构复杂, 内冷管之间以及内冷管与筒体之间的间距极为有限, 这使得磁粉检测在实际操作中难以有效实施。此外, 磁粉检测对操作环境要求较高, 难以在受限空间内进行。

2.3 渗透检测

渗透检测是一种通过渗透液渗入表面裂纹或缺陷来检测的方法。尽管在理论上可以勉强进行, 但由于检测环境处于受限空间内, 不仅操作条件恶劣, 而且由于内冷管靠近筒体一侧的间距不足, 检测结果的观察也受到极大限制, 难以获取准确的检测信息。

2.4 传统射线检测

传统的射线检测(如胶片射线检测)虽然能够较为完整地观察到内冷管的内部情况, 但其检测流程繁琐且效率低下。完成检测后, 需要将底片带回暗室进行处理和晾干, 才能观察到检测结果, 随后还需返回原位置对缺陷位置进行标记。这一过程不仅成本高昂, 而且劳动强度大, 难以满足现代工业生产对快速检测和高效排查的需求。

2.5 水压试验

水压试验是一种通过向设备内部施加压力, 观察是否有泄漏点的方法。虽然可以确定泄漏点的位置, 但对于未泄漏位置的情况则无法进行有效判定, 其检测范围和结果的全面性存在明显不足。此外, 水压试验需要在设备停机状态下进行, 且可能对设备造成二次损伤。

2.6 X 射线数字成像技术的优势

相比之下, X 射线数字成像技术具有显著的优势: 实时成像能够实时观察缺陷的形态, 无需等待胶片处理。高分辨率可以清晰地显示微小缺陷, 如早期微裂纹。高效率检测, 能够快速定位泄漏点并评估其严重程度。无

损检测对设备无损伤,不会影响设备的正常使用。通过X射线数字成像,技术人员能够在第一时间获取清晰、准确的检测图像,快速定位泄漏点,并对其严重程度进行评估,从而为后续的修复工作提供有力支持^[2]。

2.7 综合评价与选择

基于以上分析,综合考虑检测效率、成本以及实际操作的可行性,本次检测最终选择了X射线数字成像技术。这一选择不仅能够有效解决传统检测方法在聚合釜内冷管检测中所面临的诸多问题,还能显著提高检测工作的效率和准确性,为尽快排查泄漏位置、排除安全隐患、恢复企业生产提供了可靠的技术保障。

3 X射线数字成像原理

3.1 数字成像系统构成与工作流程

X射线数字成像系统是一种先进的无损检测技术,广泛应用于复杂工业设备的内部结构检测。该系统由高频X射线源、非晶硅平板探测器、图像采集处理模块、存储控制单元以及可视化终端组成。在检测过程中,X射线源在稳定的电压和电流条件下发射射线束,这些射线穿透被测对象后会发生能量衰减。衰减后的射线强度信息被探测器感应并转换为电信号。随后,信号经过放大、电压整形以及模拟-数字转换,通过高速接口传输至处理平台。在成像软件中,这些信号会经过图像重建和几何校正处理,以生成清晰的图像。系统内置的自动曝光和动态增益控制模块能够根据被测对象的不同厚度和密度区域自动调整参数,确保成像的一致性和准确性。此外,系统具备多幅拼接、密度增强和边界识别功能,可提升图像微细结构清晰度。成像过程由程序模块实时闭环调控,根据反馈动态修正参数,显著增强对聚合釜内冷管等复杂结构内部细节的分辨能力。

3.2 射线穿透与图像重建机理

当X射线穿透物体后,其剩余强度会形成投影图像。图像的灰度分布直接反映了物体内部结构的吸收特性以及几何轮廓^[3]。然而,数字探测器记录的原始信号通常会受到散射和背景噪声的干扰,因此需要经过校正处理,以确保图像的准确性和清晰度。图像重建过程采用多角度投影算法,通过反投影迭代计算,精确恢复三维空间中不同截面的衰减系数分布。这一过程能够揭示内冷管管壁上的裂纹、腐蚀点或泄漏区域,并以数字形式量化其扩展趋势。重建后的图像在分析软件中呈现出高

对比度的特征,使得早期微小损伤能够被清晰识别。

4 现场检测应用

4.1 参数设置

采用双壁双影透照方式,检测电压设置为180kV,检测电流为5mA,对8组U型内冷管组进行全面检测。通过优化参数,确保成像效果与检测效率的平衡,为后续的缺陷识别与分析奠定基础。

4.2 成像装置布置与探测器配置

针对聚合釜内冷管的检测需求,成像装置的布置与探测器配置至关重要。聚合釜壳体内径为2600mm,筒体高度5200mm,内部内冷管呈径向排列且密集分布。为了确保检测的全面性和准确性,成像系统采用射线源与平板探测器对穿式布置,实现对8组冷管的逐组扫描检测。这种布置方式能够有效减少检测盲区,确保成像的完整性。探测器选用有效像素尺寸为100 μ m的非晶硅平板探测器,成像尺寸为430mm \times 430mm,动态范围达到16bit,具备高灰度解析力和良好的线性响应性能。通过特制工装将探测器固定于内冷管外壁,不仅能够快速定位,还能灵活调节角度,避免因多次布置而引入的误差^[4]。

4.3 射线源类型与曝光参数优化

在聚合釜内冷管的检测中,射线源的选择和曝光参数的优化是确保成像质量的关键环节。检测系统采用定向型微焦点X射线发生器,靶材为钨,焦点尺寸精确控制在0.4mm以内,最高工作管电压可达250kV,最大管电流为5.0mA。这种射线源具备长时间稳定曝光能力,能够满足大厚度金属壁设备的成像需求。针对内冷管规格为 Φ 76 \times 4mm的检测要求,需要实现总穿透厚度约8mm的有效成像。经过多次实验验证,射线源的电压被设定为180kV,电流为5mA,曝光时间控制在2.8s。这一参数组合能够在保证穿透能力的同时,最大化图像的信噪比,确保成像清晰度。系统配备自动曝光算法,根据灰度测试片反馈动态调整曝光时间,确保不同壁厚区域成像稳定。X射线采用17°以内圆锥束结构,避免边缘失焦与灰度模糊。通过标准楔块和多级缺陷试片校正,系统在复杂厚度条件下具备0.3mm裂纹的识别能力,实现泄漏点早期精准检测,显著提升检测效率与准确性,为内冷管安全检测提供可靠支持。

5 结果分析与技术适用性评价

5.1 结果分析

在检测过程中，通过X射线数字成像技术获取的图像清晰地展示了内冷管及其折流板的状况。图1显示内冷管内折流板完好，未发现明显缺陷；图2显示左侧内冷管内折流板断裂；图3显示7-1组折流板划伤内冷管（右侧）；图4显示折流板划伤内冷管（2-2组）造成泄漏。这些图像为分析泄漏原因提供了有力依据。

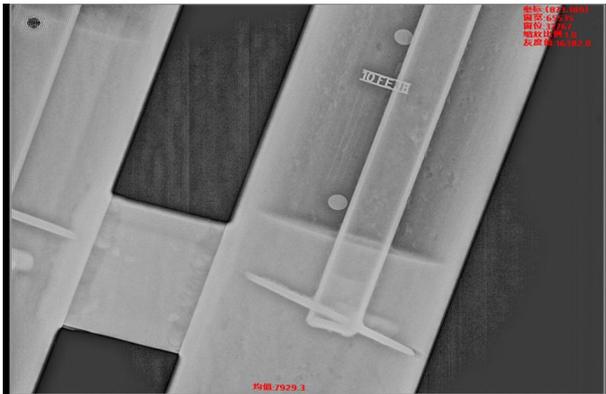


图1 内冷管内折流板完好（6-2组）

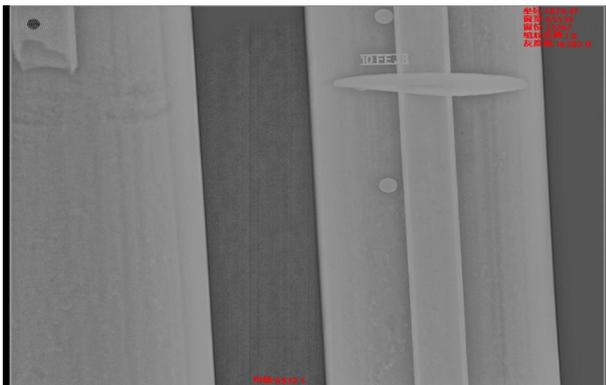


图2 左侧内冷管内折流板断裂（8-2组）



图3 7-1组折流板划伤内冷管（右侧）

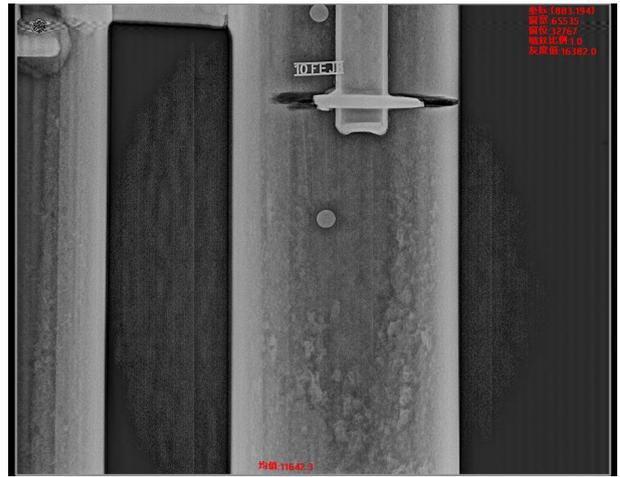


图4 折流板划伤内冷管（2-2组）造成泄漏

原因分析：由于周期性的热负荷交替及周期性压力波动，加之内冷管内部折流板固定不牢，导致折流板周期性振动，从而对内冷管产生磨损，严重时甚至导致折流板断裂脱落。随着时间推移，磨损部位逐渐加深，最终形成对内冷管的切割效果，导致泄漏。

问题处理：使用单位对受损的内冷管进行了更换，并对折流板进行了两端固定，以减少振动，避免折流板对内冷管的磨损。X射线数字成像技术不仅能实时观察检测情况，还能清晰显示缺陷形态。通过对图像的处理，使缺陷显示更加清晰，为判断缺陷类型及分析缺陷产生原因提供了有力依据。该技术对于高效完成泄漏故障排查、提前查找隐患部位、预防泄漏发生、减少企业经济损失具有重要意义。

5.2 系统局限性与优化方向探讨

尽管X射线数字成像系统在聚合釜内冷管泄漏检测中表现出色，但仍存在一些局限性。由于聚合釜内部结构复杂，内冷管呈径向对称布置且间距较小，部分角度的X射线入射路径容易受到邻近内冷管或支撑件的干扰，导致图像中存在阴影重叠区，影响缺陷判读的清晰度。当前系统曝光参数固定，在高、低厚度区域易出现过曝或欠曝，影响图像质量稳定性。数据处理中，边缘识别与裂纹轮廓提取算法虽精度较高，但在多重缺陷集中区域仍存在识别模糊、轮廓融合问题，限制了缺陷空间分布分析的可靠性。未来可引入多能谱X射线源，自动调节管电压与曝光时间，优化图像质量；同时引入基于深度学习的图像分割模型，增强复杂区域缺陷识别精度，提高系统准确性和可靠性。

6 结语

聚合釜内冷管泄漏是化工生产的关键隐患。X射线数字成像技术凭借高分辨率、实时成像和无损检测优势,实现了高效检测与精准分析,显著提升了检测效率和准确性,为快速排查泄漏点、排除隐患提供了有力支持。然而,当前系统在复杂结构区域仍存在阴影重叠、图像对比度不足及多重缺陷识别模糊等问题。未来,引入多能谱X射线源和基于深度学习的图像分割模型,有望优化图像质量,增强复杂区域缺陷识别精度,拓展检测深度与适应性,为化工设备安全运行提供更可靠保障。

参考文献

[1]张誉戈,马舸,万鹏颖,等.X射线成像闪烁体光产额测量技术与优化方法[J].发光学报,2025,46(04):630-641.

[2]何家伟,陈天浩,余斌,等.基于单重态和三重态到双重态的能量转移构建的高效近红外有机X射线成像闪烁体(英文)[J].ScienceChina(Materials),2025,68(04):1057-1063.

[3]姜海峰,郭飞,包涛,等.基于脉冲X射线成像技术的木构件图像识别及缺陷识别研究[J].工程质量,2025,43(01):4-11.

[4]朱开阳,王晓玲,顾先锋.冷阴极X射线成像技术在高参数火电机组无损检测中的应用[J].焊接技术,2024,53(12):51-55.

作者简介:罗争光,男(1990.02-)汉族,湖南人,工程师,研究生学历,主要从事特种设备行业。