

压力容器与管道裂纹检验中的无损检测技术探讨

岳晟, 胡斌, 李运成

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

摘 要 : 鉴于压力容器与管道在工业生产中的广泛应用及裂纹隐患对安全的严重威胁, 本文对其裂纹检验中的无损检测技术进行了分析, 从技术原理、操作要点、应用策略等方面, 对超声波、渗透、磁粉、相控阵等无损检测技术展开详细论述, 提出依据工况选技术、规范操作、多技术联用等应用方法。旨在证实合理运用无损检测技术可有效保障压力容器与管道安全, 为进一步提升裂纹检测精度、保障检测可靠性的效果、解决传统检测技术准确性不足与效率低下等问题提供技术支持,

关 键 词 : 压力容器; 管道裂纹检验; 无损检测技术

Non-Destructive Testing Technology in Crack Inspection of Pressure Vessels and Pipelines

Yue Sheng, Hu Bin, Li Yuncheng

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

Abstract: Given the widespread application of pressure vessels and pipelines in industrial production and the serious safety threats posed by crack hazards, this article analyzes non-destructive testing techniques in crack inspection. Detailed discussions are provided on ultrasonic, penetrant, magnetic particle, phased array, and other non-destructive testing techniques from the perspectives of technical principles, operational essentials, and application strategies. The article proposes application methods such as selecting techniques based on working conditions, standardizing operations, and combining multiple technologies. The aim is to demonstrate that the rational application of non-destructive testing technology can effectively ensure the safety of pressure vessels and pipelines, providing technical support for further improving crack detection accuracy, ensuring reliable detection results, and addressing issues such as inadequate accuracy and efficiency of traditional detection techniques.

Keywords: pressure vessel; pipeline crack inspection; non-destructive testing technology

压力容器与管道作为工业生产的关键载体, 其安全稳定运行至关重要。然而, 裂纹缺陷的存在严重威胁设备安全, 易引发泄漏、爆炸等重大事故。传统检测手段在裂纹检测的准确性、深度与广度上存在局限, 难以满足日益增长的安全需求。在此背景下, 深入研究无损检测技术在压力容器与管道裂纹检验中的应用, 对及时发现并消除裂纹隐患、保障设备安全运行意义重大, 能够全方位推动压力容器与管道裂纹检验工作向智能化、高效化迈进, 为工业安全提供更有力的保障。

一、压力容器与管道裂纹检验中的无损检测技术

(一) 超声波检测

超声波检测是压力容器与管道裂纹检验中应用极为广泛的无损检测技术, 基于超声波在不同介质中传播时, 遇界面会产生反射、折射与透射现象。当超声波传入压力容器或管道内部, 若存在裂纹, 超声波在裂纹处将发生反射, 反射波被探头接收并转化为电信号, 经仪器分析处理后以波形图呈现。在操作时, 需依据容器或管道的材质、厚度、形状等因素, 精心选择合适频率的超声波探头。对于薄壁压力容器, 宜选用高频探头, 因其分辨率高, 能精准检测微小裂纹; 对于厚壁管道, 低频探头则更具优势, 可保证超声波有足够穿透深度。在检测过程中, 要严格控制探头的移动速度与扫查方式, 确保检测区域全覆盖且无遗漏。为

提升检测准确性, 常采用多探头联合检测, 从不同角度发射与接收超声波, 全面捕捉裂纹信息。超声波检测的优势显著, 对内部裂纹敏感度高, 能有效检测出微小裂纹, 且检测速度快, 效率高, 可对大面积区域进行快速扫查。

(二) 渗透检测

渗透检测在压力容器与管道表面及近表面裂纹检验中发挥着关键作用, 利用液体的毛细作用, 将含有染料或荧光剂的渗透液涂覆在被检物体表面, 渗透液会在毛细作用下渗入裂纹等缺陷内。随后, 去除表面多余渗透液, 再施加显像剂, 裂纹内的渗透液被吸附至表面, 显现出缺陷的形状、位置与大小。在实际操作中, 要对压力容器与管道表面进行严格预处理, 确保表面清洁、干燥, 无油污、铁锈等杂质, 保证渗透液能充分渗入裂纹。渗透时间的把控至关重要, 时间过短, 渗透液无法充分进入缺陷; 时

间过长,则可能导致背景污染,影响检测结果判读。通常,对于表面粗糙的管道,渗透时间需适当延长。显像剂的喷涂应均匀、薄厚适中,保证清晰显像。渗透检测的优点在于对表面开口裂纹检测灵敏度极高,操作简便,无需复杂设备,对检测人员技术要求相对较低。

（三）磁粉检测

磁粉检测主要适用于铁磁性材料制成的压力容器与管道裂纹检验,基于铁磁性材料在磁化后,若表面或近表面存在裂纹等缺陷,会导致磁力线畸变,产生漏磁场,吸附施加在表面的磁粉,形成磁痕,以此显示缺陷位置与形状。在实施磁粉检测时,需先选择合适的磁化方法,常见有周向磁化、纵向磁化与复合磁化。对于圆形管道,周向磁化可有效检测轴向裂纹;纵向磁化则多用于检测环向裂纹。磁化电流的大小也需精准调节,电流过小,无法产生足够漏磁场吸附磁粉;电流过大,可能导致工件过热甚至损坏。磁粉的选择同样关键,分为荧光磁粉与非荧光磁粉,荧光磁粉在紫外线照射下发光,检测灵敏度更高,尤其适用于暗环境或细微裂纹检测。检测过程中,磁粉的施加方式要均匀,可采用喷洒或浸涂法。磁粉检测的突出优势是对表面及近表面裂纹检测精度高,检测速度快,检测结果直观易判读。

（四）相控阵检测

相控阵检测作为一种先进的无损检测技术,在压力容器与管道裂纹检验中逐渐崭露头角,通过控制阵列探头中各阵元的激励时间延迟,实现超声波束的灵活聚焦、偏转与扫描。在实际检测压力容器与管道时,可根据其结构特点与可能存在的裂纹位置,在检测软件中预先设定超声波束的扫描路径与聚焦区域。对于焊缝部位,可使超声波束沿着焊缝走向进行多角度、多深度扫描^[1]。操作时,相控阵检测设备能实时采集大量检测数据,并通过先进的数据处理算法生成直观的图像,清晰呈现裂纹的位置、尺寸与形状。相较于传统超声波检测,相控阵检测优势明显,它可实现对复杂形状、不规则部位的精确检测,检测速度快且覆盖范围广,能在短时间内完成大面积检测任务。其对裂纹的定量分析更为准确,可提供裂纹深度、长度等详细参数。

二、压力容器与管道裂纹检验中无损检测技术的应用策略

（一）依据工况选择适配无损检测技术

深入剖析压力容器与管道的材质特性,对于铁磁性材料,磁粉检测凭借其对表面及近表面裂纹的高灵敏度,成为检测轴向与环向裂纹的理想选择,对于非铁磁性材料,则需排除磁粉检测,转而考虑超声波检测、渗透检测或相控阵检测。对于形状规则、表面平整的压力容器,超声波检测与相控阵检测能够充分发挥作用,通过精准控制探头角度与波束走向,可全面覆盖检测区域^[2]。对于形状复杂、存在大量拐角与不规则曲面的管道,渗透检测更具优势,其依靠液体毛细作用,能有效检测表面开口裂纹,不受结构形状过多限制。在高温、高压且介质具有腐蚀性的恶劣环境下,需选用能适应此类条件的检测技术。超声波检测在高温环境

下,需配备耐高温探头,并对声速、衰减等参数进行修正,保证检测准确性;在强腐蚀环境中,渗透检测后要及时清洗,防止残留渗透液对设备造成二次腐蚀^[3]。对于大规模管道检测项目,相控阵检测虽设备成本高,但检测速度快、覆盖范围广,能大幅缩短检测周期,从长远看可降低总成本;对于小型压力容器或局部检测任务,渗透检测与磁粉检测操作简便、成本低廉,更具性价比。

（二）规范操作确保检测数据准确性

在实施无损检测前,需对检测人员进行严格培训,使其熟练掌握各类检测技术的操作要点与规范。以超声波检测为例,操作人员要依据压力容器与管道的材质、厚度,精确选择探头频率与型号。薄壁容器选用高频探头以提升分辨率,厚壁管道则需低频探头保证穿透深度。在检测过程中,探头的移动速度与扫查方式直接影响检测结果。通常采用锯齿形或螺旋形扫查路径,确保检测区域全覆盖且无遗漏,移动速度应保持均匀稳定,一般控制在每秒20—50mm,过快可能导致缺陷漏检,过慢则影响检测效率。合理设置增益、阈值等仪器参数,增益设置过高会使噪声信号增强,过低则可能遗漏微弱缺陷信号^[4]。在渗透检测中,表面预处理需采用打磨、清洗等方法,彻底清除设备表面的油污、铁锈与氧化皮,确保渗透液能充分渗入裂纹。渗透时间要严格把控,依据工件表面粗糙度与裂纹类型,一般在10—30min不等,时间过短渗透不充分,过长则易造成背景污染。显像剂的喷涂应均匀、薄厚适中,厚度控制在0.05—0.1mm,保证缺陷显示清晰。磁粉检测时,磁化方法与电流大小的选择尤为关键。对于圆形管道,周向磁化用于检测轴向裂纹,纵向磁化检测环向裂纹,磁化电流需根据工件尺寸、材质与磁导率精确调节,过小无法产生足够漏磁场吸附磁粉,过大则可能使工件过热甚至损坏^[5]。相控阵检测操作更为复杂,检测人员要在检测软件中精确设定超声波束的扫描路径、聚焦区域与激励时间延迟,确保波束能精准覆盖目标区域,并实时监控数据采集过程,及时调整参数,保证数据准确可靠。

（三）多技术联用提升裂纹检测精度

单一无损检测技术往往存在局限性,多技术联用可有效弥补不足,显著提升裂纹检测精度。将超声波检测与相控阵检测结合,能发挥二者优势。超声波检测对内部裂纹敏感度高,可初步探测出裂纹的存在;相控阵检测则能通过灵活控制波束,对裂纹进行多角度、多深度扫描,精确确定裂纹的位置、尺寸与形状。在实际操作中,先利用超声波检测对压力容器与管道进行全面粗扫,快速发现潜在裂纹区域,再运用相控阵检测对重点区域进行精细检测。对于表面及近表面裂纹,采用磁粉检测与渗透检测联用的方式^[6]。磁粉检测对铁磁性材料表面及近表面裂纹检测精度高,能快速定位裂纹位置;渗透检测则对表面开口裂纹灵敏度极高,可清晰显示裂纹形状与大小。操作时,先进行磁粉检测,确定大致裂纹范围,再对该区域进行渗透检测,细化裂纹信息。在检测复杂结构的压力容器与管道时,还可将超声导波检测与射线检测相结合。超声波能在长距离管道中快速传播,检测大面积区域,发现可能存在的缺陷;射线检测则对内部缺陷的成像效果

好，准确判断缺陷性质。先用超声波进行快速筛查，锁定可疑部位，然后采用射线检测进行详细分析^[7]。多技术联用并非简单叠加，而是依据不同技术的特点与优势，精心设计检测流程。在实施过程中，要注意不同技术检测结果的相互印证与补充，对不一致的数据要深入分析原因，可能是检测方法的局限性、操作误差或裂纹特性导致。

（四）利用软件辅助分析检测的结果

随着信息技术的飞速发展，软件在无损检测结果分析中发挥着日益重要的作用。在超声波检测与相控阵检测中，检测设备配套的分析软件能对采集到的大量数据进行高效处理。软件通过先进的算法，可自动识别波形特征，判断是否存在裂纹以及裂纹的大致位置。在超声波检测波形图中，软件能依据反射波的幅值、相位与时间差，初步确定裂纹深度与尺寸。软件还具备数据存储与对比功能，可将当前检测数据与历史数据进行比对，分析裂纹的发展趋势。对于压力容器与管道的定期检测，通过软件对比不同时期的数据，能及时发现裂纹的扩展情况，为设备维护决策提供有力支持^[8]。在渗透检测与磁粉检测中，图像处理软件可对缺陷显示图像进行增强与分析。软件能提高图像对比度，使裂纹轮廓更清晰，便于准确测量裂纹的长度、宽度等参数。软件还可利用模式识别技术，对裂纹的类型进行初步判断，区分横向裂纹、纵向裂纹或疲劳裂纹等。在射线检测中，专业的射线图像分析软件功能更为强大，可对射线底片或数字化图像进行三维重建，从不同角度观察缺陷形态，精确测量缺陷的体积与深度^[9]。软件能根据缺陷的形状、灰度值等特征，结合材料特性与工艺标准，评估缺陷的危害性，为设备的安全评级提供量化依据。

（五）定期校准设备保障检测可靠性

各类无损检测设备都有其特定的校准要求与周期，以超声波检测设备为例，需定期对探头的频率、灵敏度与波束指向性进行

校准。采用标准试块，通过精确测量试块上已知尺寸的人工缺陷反射波，对探头性能进行评估与调整。校准频率一般为每半年一次，若设备使用频繁或在恶劣环境下工作，校准周期应适当缩短^[10]。对于渗透检测设备，要定期校准渗透液与显像剂的浓度。采用折光仪或比重计等专业的浓度测量仪器，确保渗透液与显像剂的性能符合标准要求。浓度偏差可能导致渗透效果不佳或背景污染，影响检测结果判读。磁粉检测设备的校准重点在于磁化电流的准确性与磁粉的性能。使用标准电流表对磁化电流进行校准，保证电流输出稳定在规定范围内。定期对磁粉进行性能测试，如检测磁粉的粒度分布、磁性强度等，确保磁粉能有效吸附在漏磁场区域，准确显示裂纹位置。相控阵检测设备的校准更为复杂，需对仪器的信号发射与接收通道、延迟时间精度、探头阵列性能等进行全面校准^[11]。采用高精度的校准装置，对每个阵元的激励时间延迟进行精确测量与调整，确保超声波束能按照预定的路径与角度传播。校准周期一般为每年一次，但在设备维修、更换关键部件或检测精度出现异常时，应及时进行校准。

三、结束语

通过上述分析可知：超声波、渗透、磁粉、相控阵等无损检测技术各有特点与适用范围，在压力容器与管道裂纹检验中发挥着重要作用。通过依据工况精准选择适配技术，可提高检测针对性；规范操作流程，确保检测数据准确可靠；多技术联用，有效提升裂纹检测精度；利用软件辅助分析，深入挖掘检测数据价值；定期校准设备，保障检测可靠性。综合应用这些策略，能全面、准确地检测出压力容器与管道中的裂纹缺陷，为设备安全评估与维护奠定坚实基础。

参考文献

[1] 顾耀辉. 压力容器管道裂纹检验中无损检测技术研究 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27(4): 193-195, 192.
[2] 王海洋. 压力容器与管道裂纹检验中的无损检测技术研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(8): 105-107.
[3] 孙嘉. 浅谈压力容器压力管道检验的裂纹问题 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(6).
[4] 姚俊峰, 郑天宇, 何庆昌. 压力容器管道裂纹检验中无损检测技术应用分析 [J]. 商品与质量, 2022(47): 73-75.
[5] 强敏娜, 张良, 王永乐, 等. 在用压力管道裂纹检验中无损检测技术分析 [J]. 山西化工, 2023, 43(1): 160-161, 166.
[6] 庄海立. 基于超声波探伤技术的锅炉压力容器无损检测方法 [J]. 今日制造与升级, 2024(4): 23-25, 48.
[7] 陈灿春, 洪若云, 刘鹏程, 等. 渗透检测在压力容器、管道无损检测中的应用 [J]. 化工生产与技术, 2022, 28(4): 41-42.
[8] 郭秀芹. 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹探析 [J]. 机械与电子控制工程, 2024, 6(7): 81-83.
[9] 傅捷, 吴银伟. 锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题及预防措施 [J]. 工程建设, 2022, 5(8): 64-66.
[10] 周永杰, 何晓明, 马俊, 等. 基于多频交流场指纹法裂纹缺陷信号的处理方法设计 [J]. 青海师范大学学报（自然科学版）, 2022, 38(4): 45-51.
[11] 张静. 压力容器检验过程中的常见裂纹研究 [J]. 优格, 2022(4): 211-213.