

压力容器检验与无损检测应用探讨

吕鑫

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院 内蒙古 通辽 028000

摘要：压力容器作为化工、石油、石化等行业中不可或缺的重要设备，承载着高压介质，其安全性直接关系到工业生产的安全与稳定。本文探讨了压力容器的制造特征及其检验方法，重点分析了外部检查、内部检验及全面检验的流程与要点。同时深入讨论了无损检测技术在压力容器中的应用，包括超声波检测、磁粉检测、射线检测、渗透检测及TOFD检测等方法。通过综合比较各种无损检测技术的优缺点，旨在为压力容器的安全运行提供可靠保障。

关键词：压力容器；检验；无损检测

引言

压力容器作为工业生产中不可或缺的重要设备，其安全性和可靠性直接关系到生产过程的顺利进行和人员生命财产安全。然而，压力容器的复杂制造工艺和恶劣工作环境对其安全性能提出了严峻挑战。因此，对压力容器进行定期检验和无损检测显得尤为重要。以下通过全面分析压力容器的制造特征，详细阐述其检验方法，并深入探讨无损检测技术在压力容器中的应用，以期为压力容器的安全运行提供理论依据和实践指导。

1 压力容器制造特征

(1) 结构的复杂性。由于压力容器在各种行业的应用日益普遍，因此压力容器的构造也日趋多样。在各种行业中压力容器的构造多种多样，同一行业由于应用条件、功能需要在结构设计和技术条件的因素，压力容器的尺寸大小也不相同。通常的压力容器都包括筒体、堵头、锚固长度、法兰形和安装附件等部分，也有些容器还设置有入口、层间嵌入、内冷却管和搅拌器等。(2) 安全性能要求极高。压力容器通常需要在极端的工作条件下运行，如高温、高压以及腐蚀性环境，且其内部可能存储的介质多为可燃、易爆、有毒的有害气体或液体。鉴于这些特性，压力容器的设计、制造、安装及使用等各个环节均必须严格遵守安全标准。任何环节的疏忽都可能引发严重的安全事故，造成不可估量的后果。因此，压力容器的设计者、制造商、安装人员及使用者均应将安全管理放在首位，从源头抓起，采取有效措施进行事前预防，确保整个生命周期内的安全性。(3) 压力容器制造高度专业化。制造企业需获特殊容器生产许可，并严格遵守许可范围及法律法规、安全技术标准。针对具体产品应用，还需满足行业规范，这对设计与生产人员提出了高要求，需具备扎实的基础知识、精湛的工艺技能及深厚的安全规范理解，他们要从多维度考

量，确保设计生产的压力容器既符合安全标准，又具卓越品质，从而保障产品的整体安全性与可靠性^[1]。

2 压力容器检验方法

2.1 外部检查

外部检查不仅依赖于操作人员的专业技能和责任心，还依赖于完善的检查制度和流程。外部检查的核心在于及时发现并记录容器外部的异常现象，以便及时采取措施防止事态恶化。首先，操作人员需熟悉被检查容器的技术资料，包括设计参数、运行记录、上次检验报告等，以便对容器状态有初步了解，准备好必要的检查工具，如手电筒、放大镜、测量尺等。其次，操作人员需重点检查容器外层是否有裂纹、变形、鼓包、泄漏等明显异常。对于裂纹，要注意其形状、长度、深度及扩展方向；对于变形，要评估其对容器强度的影响；对于泄漏，要迅速查明泄漏源并采取措施。再者，检查容器的安全阀、压力表、液位计等配件是否齐全、完好、灵敏可靠。并且要关注地脚螺栓、支座等固定装置的紧固情况，防止因松动导致容器移位或倾倒。然后对防腐层进行检查，检查时需注意防腐层是否完整、有无脱落、鼓泡、龟裂等现象。对发现的问题要及时进行修复或重新涂覆。最后对检查过程中发现的任何问题均需详细记录，并根据问题的严重程度及时报告给相关部门或人员，对于严重损害情况，必须立即停止运行并采取相应的安全措施。随着技术的发展，外部检查也在逐步引入智能化手段。例如，利用无人机进行高空巡检，可以大大提高检查效率和准确性；利用红外热成像技术，可以快速发现容器表面的温度异常区域，进而判断是否存在泄漏或过热现象。

2.2 内部检验

内部检验其目的在于发现容器内部和外部的潜在缺陷，确保容器的安全运行。在检验前，必须确保容器已停止运行并排空内部介质，对容器内部进行彻底清

洗, 去除油污、锈蚀等杂质, 以便更清晰地观察内部状况。进入容器内部后, 检查人员需使用手电筒、放大镜等工具对容器内壁进行全面检查。重点关注内壁的腐蚀情况、焊缝质量、连接件紧固状态等。对于疑似缺陷区域, 可进一步采用超声波或射线探伤等方法进行确认。在内部检查的同时, 也需对外部进行更详细的检查, 除了外部检查中提到的内容外, 还需关注容器支座的稳定性、保温层的完好性等。对于关键焊缝和重要部位, 需采用相应的检测技术进行进一步检查。对于金属复合材料的容器, 还需进行金相分析检查, 通过观察材料的显微组织结构和相变情况, 可以评估材料的性能变化和使用寿命。此种检验面临的主要挑战是检验难度大、耗时长、成本高以及人员安全风险等^[2]。为解决这些问题, 可以采取以下措施: 一是加强检验人员的专业技能培训, 提高检验效率和准确性; 二是引入先进的检验设备和技术手段, 如自动化检测设备、远程监控系统等; 三是加强安全管理措施, 确保检验过程中的人员和设备安全。

2.3 全面检验

全面检验是对压力容器进行全面、彻底检查的最高级别检验。它不仅包括外部和内部检验的所有内容, 还增加了交流耐压试验和无损检测等更为严格的检验项目, 全面检验的目的在于全面评估容器的安全状况和使用寿命, 通过交流耐压试验可以检验容器的耐压强度和绝缘性能。第一, 需要制定详细的检验计划和方案, 明确检验项目、方法、标准和要求。并做好检验人员的组织分工和安全防护措施。第二, 在规定的电压和频率下对容器进行耐压试验, 观察并记录试验过程中的电压、电流、泄漏电流等参数变化, 试验结束后需对容器进行充分放电处理。第三, 对主要焊缝和重要部位进行无损抽样检查或全部焊缝检查, 根据检测结果评估焊缝质量和容器的整体安全状况。对于发现的任何缺陷或疑似缺陷, 需进行详细记录和进一步分析。在完成所有检验项目后, 对收集到的数据进行综合分析和评估, 评估内容包括但不限于容器的结构完整性、材料性能、腐蚀情况、焊缝质量以及耐压试验的结果等, 通过综合评估, 判断容器是否符合继续使用的安全要求, 并给出相应的处理建议。最后, 编制全面的检验报告, 详细记录检验过程、发现的问题、评估结果及处理建议。报告需由具有相应资质的检验人员签字确认, 并作为容器后续使用、维修或报废的重要依据。同时建立完善的档案管理制度, 妥善保存检验报告和相关记录, 以备查证。

3 压力容器常用无损检测技术的应用探讨

3.1 超声波检测方法

在进行超声波检验技术使用前, 要保证最终检验结论的正确性, 要对超声波检验技术进行充分了解和深入研究。超声波检验技术的具体使用中的基本原理和超声波的在工件上的扩散功能密切相关, 针对金属材料的高压力容器, 超声测量所用的频段大多集中在0.5~10MHz, 且能量较大, 在传递过程中功率损失较小, 而且传递距离长, 并且超声波方向性很强, 因此在材料上可以沿着特定方向迅速传递。在钢制的压力容器检验中对超声波检验方法也进行了使用, 当钢制的压力容器结构出现问题, 超声波检验技术就会和材料相互作用, 改变传播方向或特征发生反射, 此时, 通过检测反射信号的特性, 就可以对压力容器产生的缺陷作出诊断与评价, 同时, 可以根据超声波探测技术在传输中引起反射的情况, 对缺陷情况作出评估。它还能够依据超声波在传播时发生反射的位置, 对缺陷位置进行判断^[3]。超声波检验在压力容器检测中, 主要应用在检查焊缝接头、铸造机械、铸件内部的埋藏问题等, 以及在实际应用工程中无法直接对压力容器实施内部检测的, 也可在外部使用超声波实施检查。这种检验手段还具备了灵敏度好、检验成本低、现场使用方便, 对检验人员和周围环境都无害的优势。不过, 它也具有一些不足之处, 无法直接对较复杂工件进行测试, 而且使用A型脉冲反射法对测试结果的显示也不够直接, 结果难以记忆, 同时对测试人员的专业能力和经验等也存在着较多要求。

3.2 磁粉检测技术

磁粉检测技术凭借其独特的优势, 不仅广泛应用于压力容器检测过程, 还显著提升了检测效率和准确性。在压力容器的检测实践中, 磁粉检测技术能够精准捕捉由材料不连续性或缺陷引起的磁场变化。当磁粉被施加于待检表面时, 任何细微的裂纹、夹杂或变形都会导致局部磁场畸变, 进而吸引磁粉形成可见的磁痕。这些磁痕直观地展示了缺陷的位置、形状及大致尺寸, 为检测人员提供了直观且详尽的评估依据。另外, 磁粉检测技术其操作非常简便, 无需复杂的设备或耗时的准备, 检测过程即可迅速展开, 且能够覆盖大面积区域, 实现对容器整体质量状况的全面评估。此外, 该技术还具备高度的灵活性和适应性, 能够适用于不同材质、形状及尺寸的压力容器, 进一步增强了其在工业检测领域的竞争力。

3.3 射线检测方法

射线检测技术核心在于利用射线(如X射线或 γ 射线)穿透物质时发生的能量衰减现象来揭示工件内部的缺陷情况。射线检测技术的优势在于其直观性和准确性, 当射线穿透压力容器时, 遇到缺陷区域(如裂缝、

夹渣、气孔等），由于这些区域的物质组成或结构状态与周围正常材料存在差异，导致射线在该区域的衰减系数发生变化，从而在射线底片上形成明显的黑度对比。这种直观的图像对比，不仅便于检测人员快速识别缺陷的位置和形状，还能通过黑度差异大致判断缺陷的严重程度，为后续的修复或处理提供重要依据。然而，射线检测技术也面临一些挑战，对于面积型缺陷（如大面积腐蚀、裂纹网络等）的检测，射线技术可能因检测灵敏度或成像分辨率的限制而难以准确量化缺陷尺寸，导致评估结果偏于保守。此外，射线检测的速率相对较慢，尤其是在大型压力容器或复杂结构件的检测中，可能需要耗费较长时间才能完成整个检测过程。因此检测人员在实际操作中需要采取一系列措施，例如，优化射线源的参数设置以提高检测灵敏度和分辨率；合理选择检测角度和曝光时间以减少漏检和误判；加强检测现场的安全管理和辐射防护等，进一步提高了射线检测的效率和准确性，为压力容器的安全检测提供了更加可靠的技术支持。

3.4 渗透检测方法

渗透检测方法在于充分利用了液体在毛细管中的渗透作用，不仅能够有效覆盖压力容器表面的微小裂纹和缺陷，还能深入探究其内部的复杂问题，如热焊缝的完整性、冷裂纹的隐匿性以及延迟裂缝的潜在风险等。在渗透检测过程中，要选择合适的渗透剂和显像剂，优质的渗透剂能够迅速且充分地渗透到裂纹或缺陷内部，而高效的显像剂则能精准地引导渗透剂从缺陷处返回至表面，形成清晰可见的指示图像。这一过程不仅简化了检测流程，还提高了检测结果的准确性和可靠性。并且，无论是铁磁性材料还是非磁性材料，无论是表面裂纹还是内部缺陷，渗透检测都能提供直观且有效的检测结果。但值得注意的是，当压力容器表面受到污染或存在其他外界因素导致开口阻塞时，渗透检测可能无法准确识别所有缺陷，所以在实际应用该技术时，需结合实际情况进行综合评估^[4]。

3.5 TOFD检测方法

TOFD (TimeofFlightDiffraction) 检测技术，作为现代无损检测领域的一项创新技术，以其高精度和广泛适用性在压力容器及金属焊缝检测中崭露头角。该技术通过在焊缝两侧对称布置一对特性匹配的超声波探头，利用纵波在材料中的传播特性，实现了对焊缝内部缺陷的精准探测。在检测过程中，一个探头发射超声波脉冲，另一个探头接收回波信号。当焊缝完好时，接收到的主要是表面直通波和底面回波。而一旦焊缝中存在缺陷，TOFD技术还能捕捉到缺陷上下方产生的衍射信号，这些信号成为识别缺陷位置和大小的关键。通过精确计算超声波在焊缝中的传播时间以及探头接收到的回波信号间的空间差异，TOFD技术能够准确测定缺陷的埋藏深度，其误差率通常控制在百分之十以内，展现了极高的检测精度。此外，该技术所采用的探头角度多样，如45°、60°甚至70°，使得其在实际应用中能够灵活应对不同场景，满足多样化的检测需求。

结语

综上，压力容器的安全性能对于工业生产具有重要意义。通过对其制造特征的深入了解和检验方法的全面分析，我们可以更好地掌握压力容器的安全状况，并且无损检测技术的广泛应用为压力容器的安全运行提供了有力保障。未来，随着科技的不断进步和检测技术的不断创新，压力容器的检验与无损检测将朝着更加高效、准确、智能化的方向发展。这将为工业生产的安全与稳定提供更为坚实的支撑。

参考文献

- [1]褚宏宇.压力容器、管道在定期检验中的常见问题[J].化工设计通讯,2020,46(03):103+107.
- [2]应仙明.无损检测技术在锅炉压力管道检验中的应用分析[J].科学技术创新,2019(29):186-187.
- [3]王敬东.无损检测技术在锅炉压力容器检验技术中的应用探讨[J].科学技术创新,2019(16):174-175.
- [4]成伟.压力容器检验中无损检测技术的应用[J].化学工程与装备.2021,(1).236-237