

压力容器应力分析的无损检测技术

Haibao Wang^{1*}, Zhipeng Yu²

¹Weifang Special Equipment Inspection Institute, Weifang, Shandong

²Hanting Administration for Market Regulation in Weifang, Shandong

【摘要】压力容器是用于储存和运输高压流体或气体的关键工业设备，确保其安全至关重要。应力分析是评估容器结构完整性的关键步骤，以确保其能够承受高压条件而不发生故障。无损检测对于压力容器的应力分析至关重要。这些技术，例如超声波、射线和磁粉检测，可以检测出潜在的裂纹、腐蚀、变形和其他缺陷，而不会损坏容器。通过定期进行无损检测，操作人员可以及早发现问题并采取措施维修或更换设备，从而避免潜在的灾难性事故和停产。为了有效评估压力容器的工作状态和剩余寿命，应力分析和无损检测是必不可少的。本文概述了压力容器应力分析的基本原理和常用方法，系统地介绍了 X 射线检测、超声波检测、液体渗透检测和声发射检测等无损检测技术。并讨论了它们在压力容器中的具体应用，分析了每种技术的优缺点，并探讨了它们的适用范围，希望本文能够推动压力容器应力分析无损检测技术的发展。

【关键词】压力容器；应力分析；无损检测；技术应用

【收稿日期】2025 年 8 月 13 日

【出刊日期】2025 年 9 月 14 日

【DOI】10.12208/j.imi.20250002

Non-destructive testing techniques for stress analysis of pressure vessels

Haibao Wang^{1*}, Zhipeng Yu²

¹Weifang Special Equipment Inspection Institute, Weifang, Shandong

²Hanting Administration for Market Regulation in Weifang, Shandong

【Abstract】 Pressure vessels are critical industrial equipment used to store and transport high-pressure fluids or gases, and ensuring their safety is of utmost importance. Stress analysis is a crucial step in assessing the integrity of a vessel's structure to ensure it can withstand high-pressure conditions without failure. Nondestructive testing is important for stress analysis of pressure vessels. These technologies, such as ultrasonic, radiographic, and magnetic particle inspection, can detect potential cracks, corrosion, deformation, and other defects without causing damage to the container. Through regular non-destructive testing, operators can detect problems early and take measures to repair or replace equipment, thus avoiding potentially catastrophic accidents and production shutdowns. To effectively evaluate the working condition and remaining lifespan of a pressure vessel, stress analysis and non-destructive testing are required. By summarizing the basic principles and common methods of stress analysis for pressure vessels, this paper provides a systematic introduction to non-destructive testing technologies such as X-ray testing, ultrasonic testing, liquid penetration testing, and acoustic emission testing. It also discusses their specific applications in pressure vessels, analyzes the advantages and disadvantages of each technology, and examines their scope of application. It is hoped that this paper can promote the development of non-destructive testing technology for stress analysis of pressure vessels.

【Keywords】 Pressure vessel; Stress analysis; Non-destructive testing; Technology application

介绍

压力容器是指能承受内部或外部压力的密闭容

器，通常储存气体、液体或气液两相介质。压力容器

广泛应用于石油、化工、冶金、电力、航空航天等领

*通讯作者: Haibao Wang

注: 本文于 2023 年发表在 Engineering Advances 期刊 3 卷 5 期，为其授权翻译版本。

域,是工业生产中不可或缺的设备。然而,由于压力容器在使用过程中会受到各种载荷、环境因素以及材料老化等因素的影响,其结构和性能会发生变化,产生应力集中、变形、裂纹、腐蚀等缺陷,进而引发爆炸、泄漏等事故,造成严重的人员伤亡和经济损失^[1]。

为了保证压力容器的安全运行、延长其使用寿命,需要对其进行定期或不定期的检查和评估。应力分析是评估压力容器结构强度和刚度的重要手段,无损检测是查找和定位压力容器缺陷的有效方法。应力分析可以根据压力容器的工作状态、几何形状、材料性能等参数计算其各种应力和变形,并与允许值进行比较,判断其是否满足强度和稳定性要求。无损检测可以利用声、光、电、磁等物理特性,在不损坏或不影响被检测对象使用性能的情况下,检测出其内部或表面缺陷,给出缺陷的位置、尺寸、形状、性质等信息,评定其质量和完整性。

本文旨在概括压力容器应力分析的基本原理和方法,介绍常见的无损检测技术及其在压力容器中的应用,分析各技术的优缺点及适用范围,展望无损检测技术的发展趋势及前景。

1 压力容器应力分析的基本原理与方法

1.1 压力容器应力分析的基本原理

压力容器应力分析的基本原理是按照力学平衡、材料连续、变形协调的条件,建立压力容器应力与变形的数学模型,求解给定工作条件下压力容器的应力与变形分布,并与相应的强度和稳定性准则进行比较,判断其是否满足设计要求^[2]。

压力容器应力分析的主要目的如下:

- (1) 确定压力容器的结构尺寸和材料选择,使其具有足够的强度和刚度,避免设计过度或设计不足;
- (2) 预测压力容器在使用过程中可能出现的应力集中、变形、疲劳、蠕变等现象,评价其对压力容器寿命和安全的影响;
- (3) 为无损检测提供理论基础,确定检测方案和检测参数,提高检测效率和精度;
- (4) 为故障诊断、事故分析提供技术支持,查明故障或事故的原因和责任,提出改进措施和预防建议。

1.2 压力容器应力分析的常用方法

压力容器应力分析常用的方法有三种:

- (1) 解析法:解析法是利用数学公式直接求解压力容器应力和变形的的方法,适用于形状简单、材

料均匀、载荷规律等工况的压力容器。解析法的优点是计算速度快、精度高、结果直观,但缺点是只能处理一些特殊情况,不能考虑复杂边界条件、非线性因素和实际工况的影响。

(2) 数值方法:数值方法是利用计算机将压力容器离散化,将连续问题转化为离散问题,再用数值算法求解压力容器应力与变形的的方法。它适用于形状复杂、材质不均匀、载荷不规则等工况的压力容器。数值方法的优点是可以处理各种复杂问题,考虑各种影响因素,模拟实际工况。缺点是计算量较大,精度受离散化程度和算法的稳定性影响。

(3) 实验方法:实验方法是利用物理模型或原型对压力容器进行加载,测量其应力和变形的的方法。它适用于验证理论计算结果或研究难以用理论或数值方法解决的问题。实验方法的优点是能够直接反映真实情况,提供可靠的数据,但缺点是耗时、成本高,且受实验条件限制。

2 常用无损检测技术及其在压力容器中的应用

2.1 X 射线检测技术

X 射线检测技术是利用射线(如 X 射线或 γ 射线)在不同密度介质中的衰减特性,在敏感材料上成像,从而显示被检测物体内部结构及缺陷的一种无损检测技术。X 射线检测技术具有以下优点:

可以检测压力容器内部或表面的各种缺陷,如裂纹、气孔、夹杂、腐蚀等。

可对压力容器进行全面或局部试验,不受形状、尺寸、材质等限制;

可提供直观的图像记录,便于分析判断。

X 射线检测技术也存在以下缺点:

- (1) 需要使用高能射线源,对操作人员和环境有一定的危害,需要采取严格的防护措施。
- (2) 需要使用专业设备和人员,成本高,效率低。
- (3) 缺陷的深度和方向无法直接测量,需要结合其他方法进行定量分析。

X 射线检测技术在压力容器中的应用主要有:

(1) 射线照相术:射线照相术是将射线源放置在被检物体的一侧,将敏感材料(如胶片)放置在另一侧,使射线穿过被检物体并在敏感材料上成像的方法。这种方法可以清晰地显示被检物体内部或表面的缺陷,但需要较长时间进行胶片显影、显影等后处理^[3]。

(2) 实时 X 射线成像法:实时 X 射线成像法

是将射线源置于被检物体的一侧，将图像增强器或数字探测器置于另一侧，使射线穿过物体并在图像增强器或数字探测器上实时成像。该方法可以实时观察和记录物体内部或表面的缺陷，但需要使用高性能图像处理设备和软件，成本较高。

(3) 计算机断层扫描：计算机断层扫描是将射线源沿被检查物体的轴线方向移动，从不同角度进行投影，然后利用计算机重建投影数据，从而获得被检查物体各个层面的内部断层图像的检查方法。该方法可以精确测量物体各个层面的密度分布和缺陷信息，但需要运用复杂的数学算法和大量的计算资源，效率较低。

2.2 超声波检测技术

超声波检测技术是利用超声波（频率高于20kHz 的声波）在不同介质中的传播特性，在接收器上形成信号，反映被测对象内部结构及缺陷的一种无损检测技术。超声波检测技术具有以下优点：

(1) 可以检测压力容器内部或表面的各种缺陷，如裂纹、气孔、夹杂、腐蚀等；

(2) 压力容器可进行全面或局部试验，不受形状、尺寸、材质等限制；

(3) 能提供直接的信号记录，便于分析测定。

超声波检测技术也存在以下缺点：

(1) 需要使用专业设备和人员，成本高，效率低；

(2) 需对被测物体进行表面处理，以保证良好的声耦合条件；

(3) 缺陷的形状和性质无法直接测量，需要与其他方法相结合进行定量分析。

超声波检测技术在压力容器中的应用主要有：

(1) 超声波反射法：超声波反射法是将超声波发射器和接收器放置在被测物体的同一侧，使超声波在被测物体内部反射并在接收器上形成信号。该方法可以检测出垂直或近乎垂直于发射方向的物体内部或表面的缺陷，但对于平行或近乎平行于发射方向的缺陷，检测效果较差。

(2) 超声波透射法：超声波透射法是将超声波发射器和接收器分别放置在被测物体的两侧，使超声波穿过被测物体并在接收器上形成信号。该方法可以检测出被测物体内部或表面与透射方向平行或近乎平行的缺陷，但对于垂直于透射方向的缺陷，检测效果较差。

(3) 超声相控阵法：超声相控阵法是将多个超声发射器和接收器组成阵列，通过控制各阵元的激励时序和相位，实现超声波束的聚焦、扫描和重构，并在接收器上形成信号的方法。该方法可以实现对被测物体内部或表面各个方向、各个深度的缺陷检测，具有高灵敏度和高分辨率，但需要采用高性能电子设备和软件，成本较高^[4]。

2.3 液体渗透检测技术

液体渗透检测技术利用毛细现象。将含有染料或荧光剂的液体渗透剂涂抹在被测物体表面，使其渗入任何表面开口或缺陷。然后使用去除剂去除多余的渗透剂。最后，将显像剂涂抹在被测物体表面，显像剂吸收渗透剂，从而显示缺陷的位置和形状。这是一种无损检测技术，可以揭示被测物体表面开口中的缺陷。液体渗透检测技术具有以下优势：

(1) 可以检测压力容器表面开口的各种缺陷，如裂纹、折叠、夹层、夹渣等；

(2) 任何无孔隙的固体材料都可以进行试验，不论压力容器的形状、尺寸、材质等如何；

(3) 能够提供直观的缺陷显示，便于分析判断。

液体渗透测试技术也存在以下缺点：

(1) 只能检测压力容器表面开口缺陷，不能检测内部或者封闭缺陷的；

(2) 被检测物需进行表面处理，去除油污、铁锈、氧化物等；

(3) 使用有毒或易燃化学试剂，对操作人员和环境有危害，必须采取安全措施。

液体渗透检测技术在压力容器中的应用主要有：

(1) 可见光染料渗透法：可见光染料渗透法是利用可见光染料（如红色或黑色）和白色或灰色显影剂，通过肉眼或放大镜观察缺陷显示的方法。该方法简单、廉价，但需要良好的照明条件和视觉灵敏度。

(2) 荧光染料渗透法：荧光染料渗透法是利用荧光剂（如黄绿色或橙红色）和无色或浅色显影剂，在紫外线或黑光下观察缺陷显示的方法。该方法灵敏度高，能检测到微小缺陷，但需要特殊的荧光设备和暗室条件。

(3) 荧光磁粉渗透法：荧光磁粉渗透法是将含有荧光剂和磁性粒子（如铁氧体）的渗透剂涂覆在被检物表面，并在两端加磁极，形成闭合磁路，在紫

外光或黑光灯下观察缺陷显示的方法。该方法综合了荧光染料渗透法和磁粉检测法的优点，可以同时检测表面和近表面缺陷，但仅适用于铁磁性材料。

2.4 声发射检测技术

声发射检测技术是一种无损检测技术，利用压力容器在受到外部载荷或内部应力变化时产生的细微声信号，称为声发射信号。通过接收、放大、分析和处理这些信号，反映压力容器的应力状态和缺陷信息。声发射检测技术具有以下优点：

(1) 可以检测压力容器内部或表面的各种缺陷，如裂纹、气孔、夹杂、腐蚀等；

(2) 压力容器可进行全面或局部试验，不受形状、尺寸、材质等限制；

(3) 压力容器正常工作状态下，无需停机、无需卸荷，即可进行在线检测。

声发射检测技术也存在以下缺点：

(1) 需要使用专业设备和人员，成本高，效率低；

(2) 需要对声发射信号进行分析处理，消除噪声和干扰的影响；

(3) 缺陷的位置和尺寸无法直接测量，需要结合其他方法进行定量分析。

声发射检测技术在压力容器中的应用主要有：

(1) 压力容器载荷试验中的声发射检测：压力容器载荷试验中的声发射检测是在压力容器进行水压试验或气压试验时，监测压力容器在不同载荷作用下的声发射活动，判断是否存在活动缺陷或危险裂纹的方法。该方法可以有效评估压力容器的安全性和剩余寿命^[5]。

(2) 压力容器运行中的声发射检测：压力容器运行中的声发射检测是在定期或不定期检验时，利用便携式声发射仪器对压力容器进行在线监测，记录其在工作状态下的声发射活动，判断是否存在异常变化或潜在危险的方法。该方法可以及时发现并及时预警压力容器的任何故障或事故。

(3) 声发射检测在压力容器损伤评估中的应用：声发射检测用于压力容器损伤评估。声发射检测是指在修复或更换存在缺陷或损伤的压力容器前，采用专用的声发射仪器进行全面的检测，确定缺陷或损伤的类型、部位、程度及其扩展趋势，制定相应的处理方案和建议方法，为压力容器的维修或更换提供科学的指导。

3 结论

无损检测技术在评估压力容器的工作状态和剩余寿命方面发挥着重要作用。各种无损检测技术各有优势，但也存在一定的局限性，需要根据具体的检测需求选择最合适的技术或综合运用多种技术。展望未来，随着检测设备性能的提升、新技术的不断涌现以及多技术融合的发展，压力容器应力分析无损检测技术将朝着智能化、精细化、集成化的方向发展。无损检测技术与数字图像处理、人工智能等高新技术的融合，将提高检测结果的准确性和可靠性，提升检测效率，为压力容器的质量控制和安全监测提供强有力的支持。本文的研究内容可为压力容器应力分析无损检测技术的发展提供有益的参考。

参考文献

- [1] Hu Z, Parker A P. Use of a True Material Constitutive Model for Stress Analysis of a Swage Autofrettaged Tube Including ASME Code Comparison [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2022(2):144.
- [2] Perl M, Kamal S M, Mulera S. The Use of an Equivalent Temperature Field to Emulate an Induced Residual Stress Field in a Rotating Disk Due to Full or Partial Rotational Autofrettage [J]. Journal of pressure vessel technology, 2022.
- [3] Lin J, Zheng C, Dai Y, et al. Prediction of composite pressure vessel dome contour and strength analysis based on a new fiber thickness calculation method [J]. Composite Structures, 2023, 306:116590.
- [4] A H S, A N T, B R R. Experimental investigation of graphene nanoplatelets effect on the fatigue behavior of basalt/epoxy composite pressure vessels [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 171:108672.
- [5] Abarkan I, Khamlichi A, Shamass R. A Study on Low Cycle Fatigue Life Assessment of Notched Specimens Made of 316LN Austenitic Stainless Steel [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2022(2):144.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS