

Analysis of Inspection and Evaluation Techniques for Pressure Vessels under High Temperature Environment

Hongwei Jiang[#], Fan Wang, Shunwang Shi, Mingjian Jiang, Peng Gao

Chongqing Pump Industry Co., Ltd, Chongqing, 400033, China

Email: 381739233@qq.com

Abstract

Pressure vessels have been widely promoted in the industrial development, and more and more pressure vessels can adapt to the harsh production environment. Under the high temperature environment, pressure vessels can still create value. However, high temperature will inevitably cause wear and damage to the structure and materials of pressure vessels, and the multiple stress effects on pressure vessels themselves will also easily lead to deformation, cracks and other defects of pressure vessels. This paper analyzes the inspection and evaluation technology of pressure vessels under high temperature environment, discusses how to optimize the nondestructive ultrasonic inspection technology of pressure vessels under high temperature environment, and analyzes the application of stress analysis, fatigue analysis, defect analysis in the safety evaluation of pressure vessels.

Keywords: Pressure Vessel; High Temperature Environment; Non destructive Ultrasonic Testing; Thermal Stress

高温环境作用下的压力容器检验与评估技术分析

姜宏伟, 王帆, 史顺望, 姜明鉴, 高鹏

重庆水泵厂有限责任公司, 重庆 400033

摘要: 压力容器在工业化发展中得到了广泛推广, 且压力容器越来越能适应恶劣的生产环境, 在高温环境作用下, 压力容器仍然能够创造价值。但高温对压力容器的结构和材料会造成不可避免的磨损和破坏, 压力容器自身受到的多重应力作用也容易导致压力容器发生变形、裂纹等缺陷。本文对高温环境作用下的压力容器检验与评估技术进行了分析, 讨论高温环境下的压力容器如何优化无损超声检验技术, 分析了应力分析、疲劳分析、缺陷分析在压力容器安全评估中的应用。

关键词: 压力容器; 高温环境; 无损超声探伤; 热应力

前言

压力容器是一种能够承受一定压力的容器, 属于密封结构, 在工业生产领域应用广泛, 但近年来压力容器安全事故频发, 在高温环境下运行的压力容器更加容易发生泄漏、爆炸等事故, 严重危害着工作人员的人身安全, 也会造成经济损失。因此对压力容器进行检验和安全性评估能够帮助企业尽早查出压力容器存在的安全隐患, 并尽快采取相应措施预防压力容器因结构性缺陷和隐藏缺陷导致的事故发生, 压力容器检验与评估具有现实意义。

1 高温环境作用下的压力容器检验

1.1 主要检验项目

1.1.1 结构性检验

结构性检验主要是针对压力容器在高温环境下运行时内部结构、部件尺寸、接缝处是否出现泄漏进行检验，能够检查出压力容器是否出现变形影响使用。同时对焊缝、壁厚、隔热层等部位进行具有代表性的检查，是对压力容器进行的较为全面的检验。具体需要对压力容器的结构和各处零件尺寸进行测量，确认压力容器的出厂状态，用作后续检验的参考数据，在后续检验中就可以将重点放在压力容器的承载作用、性能、高温环境对容器造成的磨损等方面，能够提高压力容器检验的效率与质量。在进行结构性检验时，要保证检验数据采集全面就需要精选测点，对每个零部件都进行外观上的尺寸检验与几何测量后还应当选择更加具有代表性的测厚测漏点位进行深入的结构检验，压力容器的结构如图 1 所示。在液体易波动位置、焊缝、接管部位、封头部位等设置测点，并对容器受力面积小、易磨损或是易变形的部位着重测量。选定的测点越多，测量取得的结果准确性与可靠性也就越高，但设置过多测点会导致检验效率降低，因此需要优选测点后通过预测的方式对压力容器做整体评估。

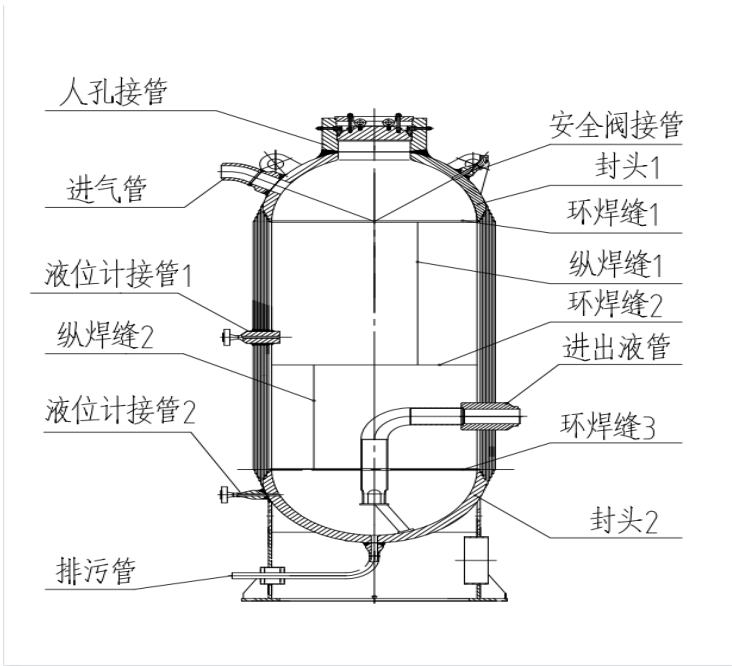


图 1 压力容器组成结构

1.1.2 表面缺陷检验

在《承压设备无损检测》中详细说明了对压力容器存在的表面缺陷进行检验的各项指标与具体项目说明，并给出了具有参考性的磁粉检测和渗透检测方法详解。压力容器本身通常使用铁磁性材料作为主要制造材料，因此使用磁粉检测方式符合大多数压力容器的特性。但压力容器根据使用性能的不同需求，在设计时部分压力容器使用非金属材料制成，对这样的压力容器使用渗透检验更加适用。相比于其他精密仪器来讲，压力容器在使用中对零件的细微变形和表面磨损要求较为宽松，工作人员通过肉眼就能观察到压力容器的许多明显表面缺陷问题，包括一部分结构性缺陷与压力容器外观缺陷，使用适当的检验工具还能检查焊缝与安全控件的使用状态。高温环境对压力容器造成的主要损害是容器表面变形，且铁磁性材料在高温环境下长期运作也会产生一定程度的磨损，进行系统化的表面缺陷检查能够及时发现压力容器是否存在外观上的形变，及时对受损严重的元件进行更换与维修，同时也能根据磨损的发生程度判断压力容器的安装与运行是否存在问题，有助于优化压力容器的使用。

1.2 常见检验方法

1.2.1 常规定期检验

相比于其他运行环境，高温环境对压力容器造成的磨损更加严重，因此对高温环境下应用的压力容器进行常规定期检验应当缩短检验周期，提高检验频率。受压力容器自身制造工艺的限制，采用焊接、冷卷等工艺生产压力容器不可避免地会产生残余应力作用，因此部分压力容器在出厂时能够通过相应的质量检验，在投入使用时才开始出现裂缝等表面缺陷问题，因而导致变形或渗漏。在常规定期检验中，首先通过工作人员肉眼观察，排除一部分直观可见的表面缺陷问题，如机械损伤、工卡具焊迹、表面气孔、腐蚀损伤等^[1]。针对压力容器的焊缝和可能存在的裂纹还要进行进一步深入检查。此外，定期检验也包括耐压性检验，这是有效检测压力容器自身焊接密封性的主要手段之一，通过定期检验监控压力容器的应用状态能够为后续的安全性评估提供更多有利数据。

1.2.2 无损超声检验

无损超声检验是针对高温环境下使用的压力容器进行质量检测的关键技术，具有准确度高、可靠性高、技术操作便捷等多重优点。在常规环境下使用超声检测技术的限制较少，但在高温环境下使用超声波则对超声波探头和检测使用的耦合剂有更高要求。

在高温环境下使用无损超声检验，随着温度上升，探头的元件会产生不同程度的膨胀，高温使探头压电晶片的性能下滑，且即便冷却处理探头也难以使其恢复原有电声转换效率，这种损伤几乎不可逆，会导致返回的超声波数据出现较大误差。高温环境下的热应力作用也会导致晶片与阻尼之间的粘合失效，导致阻尼块脱落。在高温环境下使用的超声波探头可以选择性能本就适应高温的专用探头，如专供原子炉压力容器使用的高温探头，采用特殊耐高温材料制成，在 700°C 高温环境下仍能连续使用并保证超声探测返回结果的准确性。或是使用增设了延迟块的高温探头，利用延迟块的耐高温性能隔离高温环境带来的热应力，能够有效保护探头，但探伤灵敏度有所下降，在使用之前需要进行多次调试。使用新型铜制超声探头也能适应部分高温运行条件。

无损超声检验中使用耦合剂能够排除探头与工件之间的气隙，通常使用水、甘油、机油等液体，使超声波发出的能量实现有效传递，提高超声检测的准确性。但在高温环境下，这类液体耦合剂会不断蒸发或是发生化学反应，导致探头与工件之间接触不良^[2]。因此对高温环境下使用的压力容器进行探伤处理需要选择粘度受温度影响小、耐高温、挥发性小、成分稳定不易在高温环境下发生反应的材料。从常用的硅油、真空脂、30#机油等材料中进行筛选，通过声阻抗、传声性试验和耐温耐挥发性试验检测耦合剂材料的高温传声性能，这些材料在不同高温环境下的表现各有优劣。环境温度不过高的情况下可以使用 30#机油和扩散泵油，温度超高环境下则真空脂与硅油的流失更少，表现更稳定。

2 高温环境作用下的压力容器评估

2.1 压力容器评估技术

2.1.1 压力容器应力分析方法

对压力容器进行评估的前提是分析压力容器在工作环境中受到哪些应力的影响，应力条件也是导致压力容器产生缺陷、变形、磨损、疲劳等问题的主要原因。根据应力的产生和分布范围，可以将应力作用分为总体应力和局部应力两大类进行分析；按照 应力沿壁厚的分布情况分类：若应力沿壁厚均匀分布则将其称为薄膜应力，若应力沿 壁厚线性分布则称其为弯曲应力；按照应力产生根源的不同可以分为一次应力、二次 应力和峰值应力；在高温环境下使用的压力容器还会受到热应力的影响。通过应力分析能够对压力容器的结构性缺陷问题进行追根溯源，通常结构性的裂纹、形变、疲劳都与压力容器受到的一次应力有关，压力容器自身不同元件的壁厚略有不同，在实际使用过程中受力的影响程度也不同，因此随着使用产生的磨损，压力容器受到的来自外界的一次应力通常分布较为均匀，若一次应力的强度已经远超压力容器材料自身的屈服强度，那就容易造成结构塑性失效，导致压力容器表面出现明显的断裂和形变。而二次应力则

主要来源于压力容器元件相互之间的约束力，具有一定的自限性，在高温环境下产生的热应力也应当归属于二次应力，但热应力本身不会导致压力容器的结构性失效，而是通过使压力容器材料发生形变引发一次弯曲应力^[3]。因此在使用应力分析方法评估高温环境作用下的压力容器时，主要考虑一次应力和高温热应力导致的压力容器外观形变。

2.1.2 压力容器疲劳评估方法

采用疲劳评估方法可以判断压力容器的构件缺陷对压力容器使用安全性的影响，可以用于评估压力容器的使用寿命和性能强度。压力容器产生的疲劳主要分为应力疲劳与应变疲劳两种，受容器自身不同元件壁厚不同的影响，压力容器的结构疲劳寿命变化状态也各不相同，且高温运行环境通常会导致压力容器的疲劳程度加重。然而许多压力容器在出厂时就存在初始缺陷，在高温环境下，这类初始缺陷的发展速度更快，压力容器受到周期载荷作用，裂纹等缺陷都存在萌生寿命。压力容器产生疲劳的完整过程包括：微裂纹成核、小裂纹生长、裂纹稳定扩展、断裂失效。那么对压力容器进行疲劳评估就主要从这四个阶段入手，对处于不同阶段的疲劳表现进行采集与量化，从而评定压力容器当前的疲劳程度和使用安全性。在计算时需要以压力容器的几何参数为基础，用断裂力学评估压力容器结构上产生的裂纹，对裂纹的扩展速率进行计算与预测。

在实际检验与评估中，将微裂纹成核、小裂纹生长两个阶段规定为裂纹萌生寿命，处于这两个阶段的裂纹若应力强度因子并不能达到裂纹扩展的阈值，那么即便属于裂纹缺陷，对压力容器结构的安全性影响也微乎其微，此时裂纹不会扩展，因此通常并不需要立刻停产维修^[4]。若评估得出裂纹扩展到断裂失效所需的时间远大于设备的使用寿命，那么若停产维修则会造成额外经济损失。而对于已经发展到裂纹稳定扩展阶段的裂纹则要重点评估平均应力和高温环境下的热应力引发的变形是否会导致裂纹扩展速度加快。已经接近或达到断裂失效阶段的裂纹则应当采取停产维修的决策，避免造成安全事故。

2.1.3 压力容器缺陷分析方法

对压力容器进行缺陷分析主要以断裂力学作为依据，压力容器在使用过程中逐渐产生多种不同类型的表面缺陷，包括焊迹、裂纹、气孔等等。在高温环境下使用的压力容器更加容易出现内部隐藏性缺陷，例如材料熔合不充分、夹渣、钢板分层等，不同压力容器在生产时材料自身也有可能存在部分杂质，受到高温环境的催化而形成新的缺陷。无论表面缺陷还是隐藏缺陷都会影响压力容器的承载能力，导致应力集中，导致压力容器出现裂纹、渗漏等问题，严重影响压力容器的安全使用。

假设缺陷所在部位不含有缺陷时在外载荷作用下的应力(压应力、热应力、其它任何形式的机械载荷产生的残余应力)，在评定压力容器缺陷问题时主要通过以下几组基本数据量化压力容器的使用安全性：缺陷的种类、位置和方向；结构和焊缝缺陷的尺寸,建造工序；抗拉强度、弹性模量、屈服强度或者材料发生0.2%的延伸率时的应力；断裂韧度。焊缝裂纹结构如图2所示。

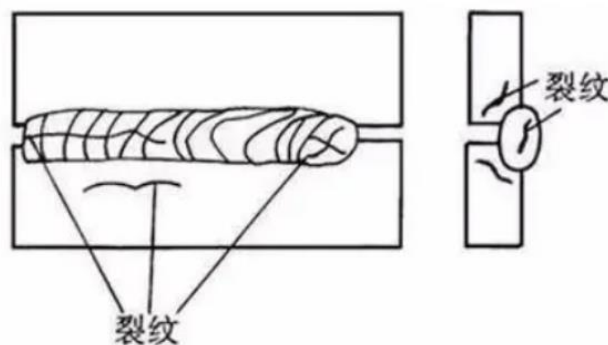


图2 焊缝区裂纹结构

在实际分析中，同一个截面上往往存在多个缺陷，缺陷相互之间还会产生应力作用，导致共同缺陷发生复合作用，这类缺陷通常属于埋藏缺陷，需要重点评估缺陷的发展趋势和缺陷的扩大可能性。也就是说，对裂纹形式的缺陷评估其是否趋近断裂；对气泡、变形等缺陷重点评估其是否可能引起裂纹。缺陷分析能够对压力容器当前的安全性和未来一段时间的安全状态演变进行预测，从而采取有效措施，通过更换元件或是冲洗紧固件等方式保护压力容器，提高压力容器在高温环境下使用的安全性。

2.2 影响评估结果的因素

对压力容器进行安全评估前需要对评估容器的基础条件进行初步全面的评估，包括历史使用条件、使用工况等，进行检查缺陷的类型及产生原因、检查应力、失效模式的判断等，综合评估检查对象。这些信息的缺失和不准确通常是导致评估结果可靠性不足的主要原因。评估方法的选取若脱离对象的运行工况也会导致评估结果失效^[5]。在高温环境下运行的压力容器在检验评估过程中会对检验器具的使用性能造成一定的影响，其中，高温对超声检验的准确性影响最为明显。

常规超声波的测量温度通常在-20℃~60℃，此时的精度为0.5%，高温环境下运行的压力容器明显已经超出这个温度范围。高温会导致检测介质的传播声速受到影响，进而影响折射角，通常随着温度不断升高，纵波的声速呈线性下降。且高温环境会导致超声波的衰减系数更加难以计算，导致探伤结果不稳定，高温环境下衰减系数的波动更加剧烈。因此在高温环境下使用超声波检测需要考虑到温度与声速、温度与衰减系数之间的关系，选用更耐高温的探头和流失更小、传声效果更好的耦合剂，抵消高温环境导致的超声波检验误差，评估结果的准确性。

结语

掌握高温环境下压力容器的检验方法，对压力容器进行定期检验能够及时探查到压力容器的磨损状态和疲劳程度，从而采取有效手段预防压力容器在运行过程中突然损坏引发严重安全事故。在评估压力容器安全性时不仅要考虑到压力容器自身的结构性缺陷，还要考虑到高温作用产生的热应力引发的变形影响，对评估结果的分析要以预测为主，做到防患于未然。

参考文献

- [1] 罗世唯.压力容器定期检验方法探讨[J].中国质量与标准导报,2022(03):58-61.
- [2] 耿亚鸽,王家帮.压力容器定期检验中发现的主要问题及分析[J].化工设备与管道,2022,59(02):1-8.
- [3] 徐琰,冀艳丽.锅炉压力容器安全检验策略分析[J].中国设备工程,2022(06):179-180.
- [4] 翁京辉.无损检测技术应用于锅炉压力容器检验的技术研究[J].中国设备工程,2022(04):171-172.
- [5] 张磊,师文静,曹仲武.压力容器定期检验周期的探讨[J].化工管理,2022(01):103-106