

# 基于失效模式的在役压力容器检验研究

孟 鑫

内蒙古自治区特种设备检验研究院包头分院 内蒙古 包头 014030

**摘 要:** 研究在役压力容器有助于精准评估其结构完整性与安全性,减少泄漏、爆炸等灾难性事故发生概率,保障人员生命财产安全与周边环境不受侵害。本文通过对压力容器常见失效模式的详细分析,深入理解在役压力容器的失效机理,阐述基于失效模式的在役压力容器的检验方法与技术。

**关键词:** 在役压力容器;失效模式;检验方法;安全评估

## 引言

压力容器广泛应用于石油、化工、能源等众多关键领域,随着工业的迅猛发展其数量持续增长且运行工况日益复杂。一旦发生失效事故,可能引发严重的安全事故,不仅危及人员安全、造成财产损失,还会对环境产生影响。因此,确保在役压力容器的安全运行成为工业生产中至关重要的任务。然而传统的压力容器检验方法往往缺乏针对性,基于失效模式的检验方法能够依据不同的失效风险,制定个性化的检验方案,提高检验的有效性与可靠性。

### 1 在役压力容器检验

在役压力容器是指已经投入使用并正在运行的在特种设备目录中属于压力容器的设备。这些容器通常在特定的温度、压力及介质环境下工作,其结构完整性和运行可靠性对于整个工业生产系统的安全稳定运行起着至关重要的作用。<sup>[1]</sup>压力容器一般由筒体、封头、接管、法兰、密封元件等部件组成,其设计、制造需遵循严格的国家标准和规范,以确保在预期的使用条件下能够安全运行。

#### 1.1 在役压力容器检验的重要性

在役压力容器的运行状况直接关联到整个生产流程的连续性与安全性。从安全角度而言,许多压力容器在高温、高压工况运行,同时部分容器盛装有毒、有害、易燃、易爆介质。一旦发生泄漏、破裂或爆炸等事故,将会对周边人员的生命安全造成严重威胁,同时可能引发火灾、爆炸、中毒等次生灾害,对环境造成极大破坏。例如,在石油化工企业中,大型反应压力容器若因内部压力失控而破裂,释放出的有毒气体可能扩散至周边居民区,造成不可挽回的人员伤亡和环境污染。通过定期检验,可以及时发现压力容器存在的缺陷、损伤,降低潜在风险,如承压部件金属的腐蚀减薄、焊接接头的裂纹、结构的变形等,从而采取相应的维修、改造或

报废措施,有效预防灾难性事故的发生,保障人员生命财产安全和生态环境的稳定。在经济层面,在役压力容器往往是企业生产线上的核心资产,其购置、安装和维护成本高昂。若因未及时发现潜在问题而导致设备突发故障,不仅会造成生产的突然中断,使企业面临巨大的经济损失,包括原材料浪费、产品损失、生产延误导致的合同违约赔偿等,还可能投入大量资金进行紧急抢修或更换设备。而合理的检验计划和有效的检验工作能够提前预警设备可能出现的问题,企业可据此安排生产计划、调配资源,进行有针对性的维护和修复,最大限度地延长设备使用寿命,降低设备全生命周期成本,提高企业的经济效益和市场竞争力。此外,在役压力容器检验对于推动工业技术的进步和行业规范的完善也具有重要意义。检验过程中发现的新问题和新情况能够促使科研人员深入研究材料性能、结构设计、制造工艺等方面的改进措施,推动相关标准和规范的更新与优化,从而促进整个行业的健康发展。

#### 1.2 在役压力容器检验现状与问题

当前,压力容器检验工作已经取得了一定的成绩,形成了较为系统的检验规范和方法体系。然而,在实际检验过程中仍存在不少问题。(1)检验技术方面。尽管无损检测技术在压力容器检验中广泛使用,但它们都有所局限。超声检测对于复杂形状和结构的压力容器检测准确性可能受到影响,且对检测人员的经验和技能要求较高,对缺陷定性较难;射线检测存在辐射安全隐患,且对微小裂纹和平面型缺陷的检测灵敏度有限;磁粉检测和渗透检测只能检测表面或近表面缺陷,无法深入探测内部缺陷。新型的无损检测技术则由于设备成本高、技术复杂,尚未得到大规模普及应用。(2)检验周期的确定方面。目前的检验周期主要依据《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG21-2016中8.1.6条规定执行,但这种固定周期的方式在进行定期检验时未能充分且全面

的考虑到不同压力容器的实际运行状况差异。一些运行环境较为稳定、维护良好的容器可能不需要如此频繁的检验，而部分处于恶劣工况或频繁启停的容器则可能需要更短的检验周期。（3）数据管理和信息化程度较低。在役压力容器检验涉及大量的数据，包括设备的基本信息、历次检验报告、维修记录等，但目前这些数据往往分散存储，部分使用单位在压力容器资料的保存管理方面无系统完善的体系，同时对于整个社会缺乏有效的整合和管理平台。这使得数据查询、分析和共享困难，不利于对容器的全生命周期进行全面跟踪和管理，也难以从大量的数据中挖掘出有价值的信息用于设备的风险评估和预测性维护。

## 2 在役压力容器的失效模式

### 2.1 腐蚀失效

腐蚀失效根据金属腐蚀破坏的形态和腐蚀区的分布分为均匀腐蚀和局部腐蚀。均匀腐蚀发生是因为在介质作用下，容器壁面均匀地发生化学反应而逐渐减薄。<sup>[2]</sup>其影响因素主要有介质成分、浓度、温度、流速等。局部腐蚀具体可分为点腐蚀、缝隙腐蚀以及晶间腐蚀。点腐蚀的形成通常是由于局部区域的金属表面钝化膜破坏，引发微小蚀坑的产生与发展。引发点腐蚀因素有介质中的氯离子浓度、金属表面的不均匀性；缝隙腐蚀产生的条件即金属与金属或金属与非金属之间存在狭窄缝隙，介质在其中滞留形成浓差电池而导致腐蚀。晶间腐蚀是由于金属晶粒边界与晶粒内部在化学成分或物理状态上的差异，在特定介质环境下，沿晶粒边界优先发生腐蚀。

### 2.2 疲劳失效

在役压力容器疲劳失效主要涵盖高周疲劳与低周疲劳两种失效形式。高周疲劳是指在循环应力作用下，历经大量循环次数（通常大于104次）而产生的疲劳破坏现象。其应力特征表现为应力水平低于材料屈服强度，循环应力幅、平均应力、材料疲劳强度以及表面质量等因素均对高周疲劳寿命有着显著影响。低周疲劳则是在循环应变作用下，经历相对较少循环次数（一般小于104次）便出现的疲劳破坏，其应变水平高于材料弹性极限。在低周疲劳的进程中，应力-应变之间的关系、材料的塑性变形特性，以及循环加载过程中所产生的硬化与软化现象，均在疲劳寿命的演变过程中发挥着至关重要的作用。

### 2.3 脆性断裂失效

在役压力容器的脆性断裂失效模式主要可归因于材料缺陷以及低温环境影响。就材料缺陷而言，材料内部诸如夹杂物、气孔、裂纹等固有缺陷在应力作用下，

会致使裂纹迅速扩展从而引发脆性断裂。这一过程与材料在冶炼、锻造、焊接等加工环节中缺陷的产生密切相关，而对这些加工过程中缺陷产生原因的剖析及相应控制方法的研究显得尤为关键。另一方面，在低温环境下，金属材料的韧性显著降低，当所承受应力超出材料的临界应力时，脆性断裂便会发生。温度对材料韧性的影响遵循特定规律，其中韧脆转变温度是一个重要的表征参数，其概念及测定方法在相关研究与实践中具有重要意义。它标志着材料从韧性行为向脆性行为转变的温度界限。在实际应用中，了解材料的韧脆转变温度对于评估在役压力容器在不同环境温度下的安全性能至关重要。因此，通过实验测定材料的韧脆转变温度，并结合实际工作环境温度，可以为容器的设计、使用和维护提供科学依据。

### 2.4 蠕变失效

在役压力容器在特定运行条件下可能遭遇蠕变失效，这一失效模式与金属材料在高温及长时间载荷作用下的原子扩散行为紧密相关。<sup>[3]</sup>当金属材料处于高温且持续承受载荷时，原子的热运动加剧，从而引发原子扩散现象，这进一步导致材料产生缓慢的塑性变形，此即为蠕变过程。温度、应力以及材料组织结构等因素对蠕变变形速率有着极为关键的影响机制。温度上升会增强原子扩散，提高蠕变速率；高应力也会加速原子滑移和位错运动，促进蠕变。材料的晶体结构、晶粒大小和相组成影响原子排列和相互作用，细晶粒可减缓位错运动，降低蠕变速率，特定第二相粒子分布可能通过钉扎位错或与基体相互作用影响蠕变行为。此外，在蠕变断裂发生前，通常会伴有显著的蠕变变形特征。其断口形貌呈现出晶间断裂或沿晶与穿晶混合断裂的特征，这与蠕变过程中材料微观组织的演变密切相关。蠕变过程中，晶粒在高温和应力下长大，晶界空洞形成并合并，导致材料承载能力下降，进而引发断裂。

## 3 基于失效模式的检验方法

### 3.1 传统无损检测技术

（1）超声检测，基于超声波在材料内的传播特性，借由对反射波、折射波或透射波变化的捕捉来探测内部缺陷。在金属材料厚度测量及裂纹检测等方面应用广泛，如在压力容器焊缝裂纹检测时，可检测确定裂纹位置、长度与深度，为焊缝质量评估与设备安全判断提供关键支撑。然其对复杂形状构件检测存困，微小缺陷检测灵敏度受探头频率制约，同时受检测人员技术水平影响较大。（2）射线检测，运用射线穿透物体的衰减特性，依据透过物体后的射线强度变化发现内部缺陷，在

检测压力容器内部结构完整性与焊缝质量时,针对容器焊缝,能清晰呈现气孔、夹渣、未焊透等缺陷形状与大小,为焊接质量评定给予直观图像依据,但存在辐射危害、设备昂贵且检测速度慢等弊端,应用时需严守安全规范并妥善规划检测计划。(3)磁粉检测,依靠铁磁性材料于磁场下表面或近表面缺陷处产生漏磁场吸附磁粉来识别缺陷,在压力容器表面及近表面裂纹、夹杂物检测中颇为有效,如在接管与筒体焊接部位表面裂纹检测时,能迅速定位并展示裂纹形态以便及时修复,不过仅适用于铁磁性材料且对表面清洁度要求较高。(4)渗透检测,将含染料或荧光剂的渗透液涂覆于被检表面,待其渗入缺陷后去除多余部分,再施加显像剂使缺陷内渗透液显现,以此检测表面开口缺陷,在不锈钢压力容器表面微小裂纹、疏松等缺陷检测中表现出色,不受材料磁性限制,但其对缺陷深度探测能力有限,检测后需彻底清洗被检表面。

### 3.2 理化检验方法

材料强度降低可能与腐蚀、蠕变等失效模式相关联,而韧性减弱则可能预示着脆性断裂风险的升高,理化检验方法主要包括化学成分分析和力学性能测试两方面,综合运用其有助于深入洞悉在役压力容器的运行状态与潜在风险,为保障其安全稳定运行提供重要的数据支持与决策依据。(1)化学成分分析,通过剖析材料的化学成分,判定材料是否契合设计要求且能确定长期运行是否致使化学成分改变,进而影响材料性能。常用的金相、光谱分析、化学滴定分析等方法各有其原理与应用范畴。例如,当对某压力容器材料在腐蚀或高温环境下的成分变化存疑时,光谱分析能够迅速且精准地测定材料内各元素含量,为评估材料性能的变动提供有力依据。(2)力学性能测试,涵盖拉伸试验、冲击试验、硬度测试等内容,通过不同的测试评定在役压力容器材料的强度、韧性、硬度等力学特性。值得注意的是,针对在役压力容器不同部位,其力学性能测试重点与取样方式各异。如在检测焊缝热影响区力学性能时,冲击试验可用于评估该区域材料的韧性变化,以确定是否符合在役安全要求。

### 3.3 在线监测技术

在役压力容器运行时工况复杂且长期受力,通过在线监测技术可实时掌握容器变化,同时许多失效源于微小缺陷发展,在线监测可在容器运行或试验时,敏锐

捕捉初期微弱信号,早期发现并精准评估结构完整性,相比传统离线检测更及时准确,有助于制定维护计划。

(1)应变片监测。应变片监测是基于将容器表面应变转换为电信号的原理,通过测量电信号变化实现对运行过程中应力变化的实时监测。<sup>[4]</sup>在应对压力波动、温度变化等工况时对于压力容器应力分布与变化监测方面具有显著应用价值。如在大型石油储罐运行期间,于罐壁关键部位粘贴应变片,可精准捕捉因液位、风力等因素引发的应力变化,有效察觉异常应力集中,提前防范因应力过大所致的疲劳或脆性断裂失效。尽管应变片监测存在长期稳定性及对环境温湿度敏感等局限性,但可通过采用高品质应变片、优化安装工艺及构建补偿电路等措施加以改善。(2)声发射监测。声发射监测在在役压力容器早期裂纹萌生、扩展以及腐蚀检测中展现了独特优势,借助材料受力变形或裂纹扩展时释放的声波信号,检测声发射信号以监测容器内部损伤演化进程。例如高压容器水压试验时,能够实时捕获材料内部缺陷在压力作用下产生的声发射信号,从而精准判定缺陷活性与发展态势,为评估容器结构完整性提供关键依据。不过,鉴于声发射监测信号解释的复杂性,需配备专业技术人员并凭借丰富经验进行深入分析判断。

### 结束语

工业技术在不断发展,在役压力容器也面临着更加复杂的工况与更高的安全要求。未来研究需要进一步完善失效模式的分析方法,考虑多种失效模式的耦合作用对容器安全性的影响;开发更加先进、高效、智能化的检验技术与设备,加强对在役压力容器检验数据的管理与分析,为实现压力容器的全生命周期管理提供有力支持,以保障工业生产的安全与可持续发展。

### 参考文献

- [1]景关,王永乐,段亚雯.基于失效模式的在役压力容器检验[J].模具制造,2024,24(06):133-135.
- [2]王靖虎,郭兵.基于失效模式的在役压力容器检验方法探讨[J].中国设备工程,2020,(01):164-166.
- [3]辛甜,张希卫.基于失效模式的在役压力容器检验检测研究[J].冶金管理,2022,(11):31-32+35.
- [4]强敏娜,刘晶,景关,等.在役压力容器检验中的常见事故及检验分析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(11):275-276+279.