

# 化工压力容器疲劳寿命延长优化路径及其延寿投资经济效益研究

罗 玮 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

**摘 要:** 压力容器作为过程工业、能源产业和化工领域的关键设备, 如果不采取科学的寿命延长优化措施, 不仅会增加安全隐患, 还会带来巨大的经济损失。本文从技术路径与经济效益两个维度展开研究, 重点探讨压力容器在服役后期的疲劳寿命延长优化路径, 并从投资角度分析延寿措施的经济价值。研究表明, 延寿措施能够在较低投资的情况下实现较高的经济回报, 为企业带来可观的效益。

**关键词:** 压力容器; 疲劳寿命; 延寿路径; 投资; 经济效益

**中图分类号:** TQ050.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 030-0160-03

## Optimization Approaches for Extending the Fatigue Life of Chemical Pressure Vessels and Economic Evaluation of Life-Extension Investments

Luo Wei (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Pressure vessels serve as critical equipment in process industries, energy sectors, and chemical engineering. Without scientific life-extension optimization measures, they not only pose increased safety risks but may also lead to significant economic losses. This study investigates both technical approaches and economic benefits, focusing on optimization strategies for extending the fatigue life of pressure vessels in their late service stages and analyzing the economic value of life-extension measures from an investment perspective. Research findings indicate that life-extension measures can achieve considerable economic returns with relatively low investment, providing substantial benefits to enterprises.

**Keywords:** pressure vessel; fatigue life; life-extension approach; investment; economic benefit

压力容器是承载高压流体的重要设备, 其运行安全直接关系到工业生产的稳定性和经济运行效率<sup>[1]</sup>。由于服役条件复杂, 容器在长期运行中不可避免地受到疲劳载荷的作用, 逐渐产生裂纹和损伤, 这些问题在传统的设计寿命周期内可能被控制在安全范围, 但随着设备老化和使用强度加大, 寿命不足的问题逐渐突出<sup>[2]</sup>。若直接更换压力容器, 不仅需要巨额的设备采购和安装费用, 还会造成生产停工带来的间接经济损失。与之相比, 通过科学的延寿优化路径来提升压力容器的疲劳寿命, 不仅能确保运行安全, 还能显著降低企业的资本支出, 提高设备全生命周期的经济价值。

### 1 压力容器疲劳寿命延长优化路径

#### 1.1 材料性能提升与改进

压力容器的疲劳行为本质上由材料的微观组织与宏观力学性能共同决定。因此, 在延长疲劳寿命的技术路径中, 材料性能的提升与改进应当作为首要环节。建议从材料选型、表面改性、焊接接头与热处理控制、以及耐蚀与氢致损伤防治等方面系统推进。

①在材料选型方面, 建议根据服役温度、介质腐蚀性 and 应力循环特征选用适宜的基材。对于承受高循

环应力的工况, 应优先选用具有良好疲劳强度和抗裂纹扩展能力的合金体系; 对于介质腐蚀严重的场合, 应优先选用耐蚀合金或采用复合结构以隔离腐蚀介质<sup>[3]</sup>。材料采购时, 应明确材料化学成分、力学性能、冲击韧性和冶金组织的验收标准, 并对关键批次实施来料检验与试样抽检以保证一致性。②在表面改性方面, 建议采用多种互补技术以抑制裂纹萌生与早期扩展。对易起裂的外表面与焊缝区域, 应优先考虑喷丸或激光冲击强化以形成表面残余压应力层, 从根本上提高抗疲劳起裂能力; 对受磨损或腐蚀影响显著的内表面, 可采用激光熔覆、热喷涂或化学镀等方法形成致密保护层, 改善表面粗糙度, 减少微缺陷作为疲劳源。必要时可采用离子注入、渗碳或氮化等热化学处理以提高表层硬度与耐蚀性, 但应同步评估热处理对基体韧性的影响, 以避免产生脆性层。③对于焊接接头与过渡区等疲劳裂纹易发部位, 建议在焊接设计与工艺上采取多道控制措施。首先应优化焊缝形状, 避免尖锐的焊缝根部与突变处产生应力集中; 其次应选择与基材相匹配且具有良好的塑性与抗裂纹扩展能力的焊材, 并严格控制焊接参数、层间温度及焊接顺序。对重要接头, 建议实施预热与后热处理以降低残余拉

应力并改善组织均匀性；在可行条件下，应采用坡口设计、对接面过渡圆角等结构措施，并在焊后对焊缝过渡区进行抛光或坡口修整以去除热影响区表面瑕疵<sup>[4]</sup>。④对于腐蚀—疲劳与氢致损伤问题，建议采取针对性的材料与工艺组合。可采用内衬、复合衬层或耐蚀合金过渡层隔离腐蚀介质，并根据介质特性选择合适的涂层体系与固化工艺。对于氢渗透风险，应在焊接后及维修后采用脱氢处理及低温时效处理以降低氢脆敏感性，并在设计与工艺规范中限制使用易受氢致影响的材料组合。⑤为了保证各类改进措施的有效性，建议建立严格的质量保证与验证体系。材料改性与热处理后应进行力学性能试验、金相分析与疲劳裂纹萌生/扩展的模拟试验，以验证改进效果；关键部位应在工厂或现场进行无损检测（例如超声、相控阵、涡流及渗透检测）以确认不存在致命缺陷。基于检测结果，应制定可执行的修补或再处理方案，确保投入服役的部件满足疲劳安全要求。⑥最后，建议将材料改进纳入设备全寿命管理体系，在设计、制造、检修及再制造各阶段形成闭环管理。通过制定材料技术规范、建立供应商资质评价与材料批次追溯制度，并结合现场检测数据持续优化材料策略，可以实现材料耐疲劳性能的长期稳定提升。

### 1.2 结构设计优化与局部强化

压力容器的几何结构和受力特点直接影响其疲劳寿命。结构设计中的不合理区域往往会产生应力集中，成为疲劳裂纹的优先萌生点。因此，在延长压力容器疲劳寿命的技术路径中，需要从整体结构优化与局部强化两个方面系统推进。

①在整体结构设计方面，建议通过计算机辅助工程手段，对容器的应力分布进行模拟分析，以识别可能的应力集中区域和薄弱环节。通过有限元分析或其他结构仿真方法，可以明确受力路径、应力峰值位置以及局部变形特征，从而为设计优化提供数据支撑。在此基础上，建议调整容器壁厚分布、增加过渡区域半径或改变壳体曲率，以减少突变应力集中。对于带有法兰、焊缝或开孔的部位，应在设计阶段预留应力缓冲区域，并通过优化过渡形状或增设圆角来平滑应力梯度，从而延缓裂纹的萌生。②在局部强化方面，建议针对高应力或易损区域采取强化措施。对于壳体与焊缝交接区域，可增加加强筋或支撑板，以分散局部应力并提高结构刚度；对于罐体受压面或开孔边缘，建议采用局部加厚或内衬增强的方法，以增强疲劳承载能力。此外，对于特殊工作条件下的局部薄弱区域，如压力波动频繁或热应力变化明显的区域，可采用局部热处理、表面喷丸或局部硬化等工艺进行强化，以

延缓裂纹发展。③在焊缝设计方面，建议通过优化焊缝形式和坡口结构来降低应力集中。对于承受交变载荷的焊缝，应优先采用圆角过渡焊缝或多道焊接分层技术，以减少焊接残余应力和局部应力峰值。焊缝布局应尽量避免交叉或锐角连接，并在焊后对焊缝过渡区进行打磨或抛光处理，以消除可能存在的微裂纹和表面缺陷。此外，焊接顺序和层间热控制也是保证焊缝与结构整体疲劳性能的重要环节，建议在设计规范中明确相关控制要求，并在施工过程中严格执行。④在复杂载荷工况下，建议通过增加结构冗余和优化受力路径提高容器整体安全裕度。具体措施包括在承压壁或环向支撑板中引入次级承力结构，使局部损伤不至于立即影响整体承载能力；在环向或轴向受力明显的部位，增加分布式支撑以均衡载荷分布。通过这种方式，可以将局部疲劳损伤的影响控制在可承受范围内，延缓裂纹发展并保持整体结构稳定性。⑤在结构优化过程中，应当结合实验验证和非破坏性检测技术进行效果评估。对于关键节点和高应力部位，应在原型或样机上进行应力测试与疲劳试验，验证优化设计的有效性；同时，利用超声波、相控阵或涡流检测对局部强化措施进行质量确认，确保焊缝、加厚部位及加强筋安装符合设计要求。通过持续监测和验证，可以及时发现潜在缺陷，并在必要时采取补强或修正措施。

### 1.3 工艺改进与运行工况控制

压力容器在服役过程中，所处的工况会直接影响疲劳损伤的累积速率。因此，需要通过工艺改进和运行条件优化，减缓疲劳裂纹萌生和扩展，从而有效延长设备寿命。

①在温度控制方面，建议制定合理的加热和冷却程序，避免急冷急热引起的热应力集中。对于易受热冲击的部位，可采用温度缓冲措施，如增加预热或过渡加热段，确保温度变化平稳，以降低材料局部应力和热疲劳风险。②在压力管理方面，建议根据工况特性优化压力循环幅度和频率。对于高频循环载荷的容器，应尽可能平滑启停过程，避免产生过大的瞬时压力波动；对于压力波动明显的管路和支承结构，可采用压力缓冲装置或优化操作顺序，以减少容器受力不均及局部疲劳累积。③在流体与介质管理方面，建议针对可能产生腐蚀或磨损的介质，采取有效的控制措施。包括合理调整介质流速、降低冲刷和涡流产生的影响，同时采用缓蚀剂、涂层或内衬保护，减少介质对金属表面的侵蚀。对高腐蚀性工况，可建议定期更换或清洗防护层，保持防护效果。④在运行管理方面，建议优化启停机和负荷调节程序，避免频繁操作造成



的附加疲劳。对于必须频繁启停的设备,可建立负荷分级控制方案,使容器承受的循环应力在允许范围内变化,同时合理安排维护周期,降低非计划停机对设备疲劳的影响。⑤在工艺参数监控方面,建议建立关键工况指标体系,对温度、压力、介质成分等进行实时或定期检查。通过分析运行数据,可以发现潜在的异常负荷或波动趋势,并及时调整工艺或操作方式,从而减缓疲劳累积速度。⑥在特殊工况下,如周期性热载荷或频繁压力波动的环境中,建议结合局部工艺改造措施,例如增加缓冲结构、导流板或局部强化支撑,以降低应力集中和局部疲劳速率。通过系统的工艺和运行管理优化,可在不改变主要结构或材料的情况下,有效延长压力容器的服役寿命。

#### 1.4 智能化监测与预防性维护

现代压力容器寿命延长路径中,智能化监测与预防性维护技术可提供实时状态评估和风险预警,是减少疲劳损伤累积的重要手段。

①在监测系统设计方面,建议针对关键受力部位进行传感器布置。如应变计、振动传感器、温度和压力传感器等,确保能够全面反映容器运行状态。传感器布置应兼顾测量精度与覆盖范围,重点监测疲劳易发部位和热应力集中区域<sup>[5]</sup>。②在数据采集方面,建议建立高频率、连续性的采集机制,确保关键参数变化能够及时捕捉。对于重要工况,建议采用多点采集和冗余测量,避免单点失效导致监测盲区。同时,可在数据采集前进行校准,保证监测数据准确可靠。③在数据分析与寿命预测方面,建议结合疲劳损伤模型和运行历史数据,建立压力容器状态评估和寿命预测体系。通过趋势分析、应力谱计算和裂纹扩展模拟,可以对潜在疲劳裂纹位置和发展速度进行预判,为维护 and 加固提供科学依据。④在预防性维护方面,建议根据监测与分析结果,制定针对性的维护计划。对于初期疲劳迹象或异常应力波动区域,可实施局部加固或修复;对于检测到潜在裂纹萌生的部位,可安排提前检修或更换局部零件,以避免故障扩大。预防性维护应与定期巡检结合,以形成持续的疲劳管理闭环。⑤在系统集成方面,建议将智能化监测与操作控制系统相结合,实现自动报警和工况优化。例如,当压力或温度超过设定阈值时,系统可自动调整操作条件或发出预警,为人工干预提供依据。同时,可将历史数据用于长期运行分析和寿命趋势修正,提升监测与管理的科学性。

### 2 延寿投资的经济效益

#### 2.1 材料性能提升的经济价值

通过提升压力容器材料的性能,可在较低投资的情

况下实现显著的寿命延长。材料改进不仅能够推迟容器整体更换周期,减少设备购置支出,还能降低维修频次,从而减少因停机造成的间接经济损失。在设备全生命周期管理中,材料性能提升所带来的投资回报具有长期性和稳定性,可有效提高企业资本利用效率。

#### 2.2 结构优化改进的经济效益

结构优化主要通过局部改造或设计调整实现,投资相对有限,但能够明显延长设备使用寿命。结构优化的经济价值体现在减少事故风险和避免因突发性停产造成的损失。与直接更换设备相比,结构优化属于一次性投入、多年受益的措施,其投资回报周期短且收益持续,具有较高的经济效益。

#### 2.3 工艺控制改进的经济回报

工艺改进依托运行管理优化进行,其投资成本较低,却能有效延缓疲劳损伤累积。通过降低应力循环幅度、优化运行参数以及控制腐蚀环境,容器的疲劳寿命得以延长,从而减少大规模检修和整体更换的需求。工艺改进的经济回报主要体现在运行效率的提高以及设备寿命延长带来的整体成本下降。

#### 2.4 智能化监测的经济效益

智能化监测系统虽然前期投资较高,但其长期经济效益显著。通过实时监控关键运行参数和实施预防性维护,企业能够及时发现潜在故障,避免突发性事故,减少维修费用与停机时间。此外,智能化监测能够提供持续的状态评估和风险预警,为延寿决策提供科学依据,使设备延寿投资的收益最大化。

### 3 结束语

压力容器的疲劳寿命延长优化不仅是技术创新的体现,更是经济效益提升的重要手段。通过材料、结构、工艺和监测等多路径的综合实施,可以有效提升设备的安全性和可靠性,延缓大规模投资支出,降低事故风险和停机损失,实现企业经济效益与安全效益的统一。

#### 参考文献:

- [1] 聂印,莫伟先,骆开军,顾舒扬.基于压力容器制造过程常见问题应力疲劳分析[J].化工设计通讯,2025,51(02):48-51.
- [2] 于鸿洲.压力容器的疲劳寿命预测与延长方法[J].今日制造与升级,2024,(08):59-62.
- [3] 孙思.化工压力容器腐蚀影响因素及防腐策略[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(12):13-15.
- [4] 田志勇,张锋,傅春浩.压力容器焊接应力与变形控制技术[J].今日制造与升级,2025,(06):69-71.
- [5] 盖圣秋.压力容器超压防护装置可靠性提升方案分析[J].中国机械,2025,(16):161-164.