

压力容器焊接结构常见损伤与失效模式分析综述

田中申¹ 郑健² 陈晓芙²

1 辽宁省安全科学研究院, 辽宁沈阳, 110167;

2 沈阳特种设备检测研究院, 辽宁沈阳, 110035;

摘要: 本文系统分析了压力容器焊接结构在长期运行过程中常见的损伤与失效模式, 主要包括裂纹、腐蚀、变形及其他损伤形式。通过对热裂纹、冷裂纹、疲劳裂纹、均匀腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀、焊接变形、热处理变形等损伤类型的成因及其对结构性能的影响进行深入探讨, 揭示了这些损伤与失效模式对压力容器安全性的严重威胁。同时, 本文还探讨了科学合理的焊接工艺设计和严格的质量控制措施在预防损伤与失效中的重要作用, 旨在为提高压力容器焊接结构的可靠性和安全性提供理论支持和实践指导。

关键词: 压力容器; 焊接结构; 损伤模式; 失效分析; 质量控制

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 024

引言

压力容器在化工、石油、能源等行业中至关重要, 其安全性和可靠性直接影响生产稳定和人员安全。焊接结构作为压力容器的核心部分, 承担连接、强度和密封等关键功能, 但在长期运行中易因多种内外因素出现裂纹、腐蚀、变形等损伤, 威胁设备安全。

裂纹是最常见的损伤形式, 包括热裂纹、再热裂纹、冷裂纹、应力腐蚀裂纹和疲劳裂纹, 通常由高温反应、氢脆或应力集中引起; 腐蚀则表现为均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀, 易导致性能下降; 变形包括焊接和热处理变形, 影响尺寸精度和疲劳寿命, 磨损和疲劳等问题同样不可忽视。

鉴于此, 本文将系统分析焊接结构常见损伤与失效模式及其影响, 探讨科学的焊接工艺和质量控制措施, 为提升压力容器焊接结构的安全性和可靠性提供理论与实践参考。

1 压力容器焊接结构概述

压力容器是承受内外压力的密闭设备, 广泛用于化工、石油、能源等领域, 可按承压等级分为低压、中压、高压和超高压容器, 按材质分为金属和非金属容器, 按结构形状分为圆柱形、球形、锥形等。

焊接结构在压力容器中的应用广泛, 具备连接复杂结构、保证强度和密封性的优势, 其可靠性直接关系到容器的安全运行。常用焊接方法有电弧焊、气体保护焊和激光焊等, 各有优缺点: 电弧焊设备简单、适用性广, 但热输入大, 易变形; 气体保护焊可提高焊缝质量, 适

合不锈钢等材料; 激光焊热影响小、速度快, 适用于高精度焊接。

焊接工艺影响焊接接头的力学性能、变形和残余应力, 焊接接头是结构的薄弱环节, 其强度和韧性直接关系到整体可靠性。焊接变形和残余应力会影响尺寸精度、承载能力和疲劳寿命。

因此, 合理选择和优化焊接工艺、材料与参数设置, 并严格质量控制, 是提升压力容器安全性和使用寿命的关键。

2 常见损伤类型及其成因

压力容器焊接结构在长期运行过程中, 由于受到多种内外因素的影响, 易产生多种损伤和失效模式, 主要包括裂纹、腐蚀、变形及其他损伤。

裂纹是焊接结构中最常见的损伤形式之一, 其成因和特点各异。热裂纹主要发生在焊接过程中, 由于高温下的冶金反应和应力作用, 导致焊缝金属在冷却过程中产生裂纹。热裂纹通常沿晶界扩展, 具有明显的沿晶特征。再热裂纹一般出现在含有沉淀强化合金元素的钢材厚板的焊后热处理或高温服役阶段, 多发生在热影响区粗晶部位, 也具有沿晶开裂特征。冷裂纹则多在焊接后冷却至室温时形成, 主要由于氢致裂纹、应力集中和材料脆化等因素引起。冷裂纹通常穿晶扩展, 具有延迟性特点。应力腐蚀裂纹是由腐蚀介质和拉应力共同作用下产生的延迟破坏现象, 其特点是裂纹沿晶扩展为主、少数穿晶断裂, 且裂纹扩展迅速, 常导致突发性断裂。疲劳裂纹则是由于循环载荷作用, 在焊接接头处萌生并逐

渐扩展，最终导致断裂。疲劳裂纹的扩展速率受应力幅值和循环次数的影响，具有累积损伤特性。

腐蚀是压力容器焊接结构的另一重要损伤形式，主要包括均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀。均匀腐蚀是指在整个焊接结构表面均匀发生的腐蚀现象，通常由于介质环境中的腐蚀性物质与材料发生化学反应引起。局部腐蚀则集中在结构的某些特定区域，如焊缝、热影响区等，常表现为点蚀、缝隙腐蚀等形式。

变形也是焊接结构中常见的损伤形式，主要包括焊接变形和热处理变形。焊接变形是由于焊接过程中不均匀加热和冷却引起的，表现为结构尺寸和形状的变化，如角变形、弯曲变形等。焊接变形不仅影响结构的装配精度，还可能导致应力集中和疲劳寿命降低。热处理变形则是由于热处理过程中温度控制不当或冷却不均匀引起的，同样会对结构的尺寸精度和性能产生不利影响。

此外，压力容器焊接结构还可能遭受其他损伤，如磨损和疲劳。磨损是由于机械作用或介质冲刷引起的表面材料损失，常发生在流体介质高速流动的部位。疲劳损伤则是由于长期循环载荷作用引起的材料性能退化，最终导致结构失效。

为更清晰地展示常见损伤类型及其成因，表 1 列出了主要损伤类型及其成因对照。

表 1：常见损伤类型及其成因对照表

损伤类型	成因概述
热裂纹	高温冶金反应和应力作用，沿晶界扩展
冷裂纹	氢致裂纹、应力集中和材料脆化，穿晶扩展
疲劳裂纹	循环载荷作用，焊接接头萌生并扩展
均匀腐蚀	腐蚀性物质与材料均匀反应
局部腐蚀	特定区域如焊缝、热影响区的点蚀、缝隙腐蚀
应力腐蚀	应力和腐蚀介质共同作用，裂纹扩展迅速
焊接变形	焊接不均匀加热和冷却，尺寸和形状变化
热处理变形	热处理温度控制不当或冷却不均匀
磨损	机械作用或介质冲刷引起的表面材料损失
疲劳	长期循环载荷作用引起的材料性能退化

通过对上述损伤和失效模式的分析，可以看出，压力容器焊接结构的可靠性和安全性受到多种因素的影响，科学合理的焊接工艺设计和严格的质量控制是预防损伤和失效的关键。

3 失效模式分析

压力容器焊接结构在长期运行过程中，由于受到多种内外因素的影响，易产生多种损伤和失效模式，主要包括断裂失效、腐蚀失效、变形失效及复合失效。

断裂失效是焊接结构中常见的失效形式，主要包括脆性断裂、韧性断裂和疲劳断裂。脆性断裂通常发生在低温或高应变速率下，材料在断裂前几乎没有塑性变形，断口呈脆性特征，如解理断裂或沿晶断裂。典型案例是某低温储罐在冬季运行时发生的脆性断裂，由于材料低温韧性不足，导致突发性断裂。韧性断裂则发生在较高温度或低应变速率下，材料在断裂前有明显的塑性变形，断口呈韧性特征，如微孔聚集型断裂。某高温反应器在长期运行后发生的韧性断裂，由于材料高温强度下降，最终导致失效。疲劳断裂是由于循环载荷作用，在焊接接头处萌生裂纹并逐渐扩展，最终导致断裂。疲劳断裂的扩展速率受应力幅值和循环次数的影响，具有累积损伤特性。某压力管道在长期振动载荷作用下发生的疲劳断裂，由于焊接接头处应力集中，导致裂纹萌生并扩展。

腐蚀失效是压力容器焊接结构的另一重要失效模式，主要包括均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀。腐蚀机理涉及电化学过程，材料在腐蚀介质中发生化学反应，导致材料性能下降。影响因素包括介质成分、温度、pH 值等。均匀腐蚀在整个结构表面均匀发生，如某化工设备在强酸环境中长期运行，导致整体壁厚减薄。局部腐蚀集中在特定区域，如焊缝、热影响区等，常表现为点蚀、缝隙腐蚀。某换热器在海水环境中运行，焊缝处发生严重的点蚀。应力腐蚀在应力和腐蚀介质共同作用下产生，裂纹扩展迅速，常导致突发性断裂。某高压容器在氯离子环境中运行，由于应力集中和腐蚀介质共同作用，发生应力腐蚀开裂。

变形失效主要包括焊接变形和热处理变形。变形机理涉及热应力和相变应力，焊接过程中不均匀加热和冷却导致结构尺寸和形状变化，如角变形、弯曲变形等。焊接变形不仅影响装配精度，还可能导致应力集中和疲劳寿命降低。某大型储罐在焊接过程中由于焊接顺序不当，导致整体弯曲变形。热处理变形则是由于热处理过程中温度控制不当或冷却不均匀引起的，同样会对结构的尺寸精度和性能产生不利影响。某压力容器在热处理过程中由于冷却速率不均匀，导致局部变形。

复合失效是指多种失效模式共同作用的情况，如腐

蚀疲劳、蠕变疲劳等。复合失效的机理复杂，影响因素多样，常导致结构在较短时间内失效。某高温高压设备在长期运行过程中，由于应力腐蚀和疲劳共同作用，导

致裂纹萌生并迅速扩展，最终发生复合失效。

为更清晰地展示失效模式的分类及特征，图2展示了失效模式分类及特征示意图。

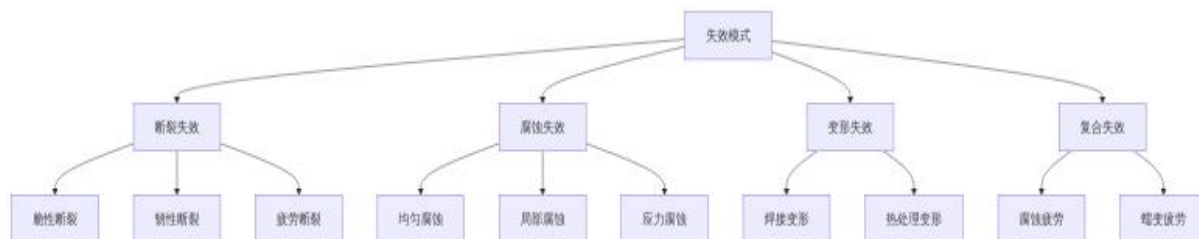


图2：失效模式分类及特征示意图

通过对上述失效模式的分析，可以看出，压力容器焊接结构的可靠性和安全性受到多种因素的影响，科学合理的焊接工艺设计和严格的质量控制是预防失效的关键。

4 预防与控制措施

在压力容器焊接结构的制造和使用过程中，材料选择与质量控制是确保结构可靠性的基础。材料的选择需综合考虑其力学性能、耐腐蚀性及焊接性能，以确保在特定工作环境下具备足够的强度和韧性。例如，低温环境下应选用低温韧性良好的材料，以防止脆性断裂的发生。质量控制则贯穿于材料采购、储存、加工等各个环节，严格把控材料成分、组织及表面质量，确保其符合设计要求。

焊接工艺优化是提高焊接结构质量的关键环节。合理的焊接工艺参数，如焊接电流、电压、焊接速度等，能够有效减少焊接缺陷，如气孔、裂纹等。此外，焊接顺序和焊接方法的优化同样重要，通过合理安排焊接顺序，可以有效控制焊接变形和残余应力。例如，采用分段退焊法可以显著降低焊接变形量，提高结构的尺寸精度。

后处理与热处理对焊接结构的性能有着重要影响。焊接后的热处理，如退火、正火等，能够消除焊接残余应力，改善材料的组织和性能。热处理工艺参数的选择需根据材料特性和结构要求进行优化，确保热处理效果。例如，对于高强钢焊接结构，采用适当的高温回火处理，可以有效降低残余应力，提高结构的疲劳寿命。

定期检测与维护是确保压力容器焊接结构长期安全运行的重要措施。通过定期进行无损检测，如超声波检测、射线检测等，可以及时发现和修复潜在的缺陷，防止其扩展导致失效。同时，定期维护包括清洁、防腐

涂层更新等，能够有效延长结构的使用寿命。例如，对于在腐蚀环境中运行的设备，定期检查防腐涂层状况并及时修复，可以有效防止腐蚀失效的发生。

综上所述，材料选择与质量控制、焊接工艺优化、后处理与热处理、定期检测与维护是确保压力容器焊接结构可靠性和安全性的关键环节，需在实际工程中予以高度重视。

5 研究现状与发展趋势

在压力容器焊接结构损伤与失效模式的研究方面，国内外学者已进行了广泛探讨。国外研究侧重于材料微观机理和数值模拟，如美国学者通过有限元分析揭示了焊接残余应力对裂纹扩展的影响，欧洲研究则强调高温环境下材料性能退化机制。国内研究则更多关注实际工程应用，如清华大学在焊接工艺优化方面取得了显著成果，哈尔滨工业大学则在无损检测技术上有深入探索。

新技术和新方法的应用为该领域研究提供了新视角。例如，激光超声检测技术因其高精度和实时性，被广泛应用于焊接缺陷识别；增材制造技术则在复杂焊接结构的制造中展现出独特优势，能够有效减少焊接缺陷。此外，大数据和人工智能技术的引入，使得焊接过程监控和失效预测更加智能化和精准化。

未来发展趋势预测显示，多学科交叉融合将成为主流，如材料科学、力学与信息技术的结合，将进一步提升焊接结构的安全性和可靠性。此外，绿色制造和可持续发展理念将推动焊接工艺向环保、高效方向发展。智能化监测与维护系统的开发，将为压力容器焊接结构的全生命周期管理提供有力支持。随着技术的不断进步，焊接结构的损伤与失效模式研究将更加深入，预防与控制措施将更加完善。

6 结论

在压力容器焊接结构的损伤与失效模式研究中,科学合理的焊接工艺设计和严格的质量控制措施至关重要。通过优化材料选择、焊接工艺参数、后处理及热处理工艺,并实施定期检测与维护,可有效预防裂纹、腐蚀、变形等常见损伤,提升结构的安全性和可靠性。未来研究应进一步融合多学科技术,如激光超声检测、增材制造及大数据分析,推动焊接结构向智能化、绿色化方向发展,实现全生命周期管理,为压力容器安全运行提供更强保障。

参考文献

- [1]朱新杰,姚森,邓明晰,等.面向化工压力容器焊接结构的超声导波阵列成像检测[J].当代化工研究,2025,(01):136-138. DOI:10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.01.043.
- [2]者霞,张贵基.压力容器焊接变形控制[J].今日制造与升级,2025,(03):93-95.
- [3]温艳梅.论免除压力容器疲劳分析设计的条件[J].现代工业经济和信息化,2022,12(05):325-327. DOI:1

0.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.05.135.

- [4]张海龙.压力容器制造的质量控制策略研究[J].中国设备工程,2021,(18):203-204.
- [5]付强,闵远胜,李美福.反应堆压力容器焊接残余应力试验及数值模拟研究[J].金属功能材料,2022,29(01):57-62. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.20210066.

作者简介:田中申,1991年1月生人,男,汉族,籍贯辽宁省盖县,辽宁省安全科学研究院,硕士研究生,工程师,主要研究材料力学及焊接性能及特种设备损伤模式风险评估等方向。

郑健,1993年4月生人,男,汉族,籍贯河北省卢龙县,沈阳特种设备检测研究院,硕士研究生,工程师,主要研究机械设计制造及特种设备损伤模式风险评估等方向。

陈晓芙,1988年12月生人,女,汉族,籍贯江苏省盐城市,沈阳特种设备检测研究院,硕士研究生,工程师,主要研究材料及特种设备损伤模式等方向。