

承压类特种设备的安全性能研究

刘 洋

河北省特种设备监督检验研究院承德分院 河北 承德 067000

摘 要：承压类特种设备广泛应用于工业生产领域，其安全稳定运行是安全生产的核心保障。本文以锅炉、压力容器、压力管道为研究对象，梳理设备安全性能核心评价指标，从设备结构材料、运行工况、运维管理多维度分析安全性能影响因素。探究结构性失效、材料劣化、运行异常等典型故障机理，结合实际案例总结性能衰减规律，最终从设计制造、检测预警、运维修复、安全管理层面提出针对性防控策略，为设备全生命周期安全管控提供技术参考。

关键词：承压类；特种设备；安全性能研究

引言：承压类特种设备具备高压、高温、连续作业的运行特征，服役环境复杂、安全风险系数高，一旦发生故障易引发爆炸、泄漏等重特大安全事故，造成人员伤亡与经济损失。随着工业规模化发展，设备服役年限增加、运行负荷提升，性能老化、缺陷累积等安全隐患日益突出。为有效防控设备运行风险，本文系统研究其安全性能影响因素与故障失效机理，梳理性能衰减规律，构建全方位安全防控体系，对提升特种设备运行安全性、筑牢工业安全生产防线具有重要现实意义。

1 承压类特种设备安全性能核心理论与影响因素分析

1.1 承压类特种设备概述及安全性能核心指标

(1) 承压类特种设备主要包括锅炉、压力容器（含气瓶）和压力管道，其工作原理基于密闭容器内压力流体的能量传递、物质转化或储存输配功能，运行特性呈现高压、高温、连续或间歇作业并存的特点。(2) 设备安全性能核心评价指标涵盖：强度指标（屈服强度、抗拉强度及壁厚裕度）、密封性指标（泄漏率、法兰连接严密性）、耐腐蚀性指标（均匀腐蚀速率及局部点蚀深度）及疲劳稳定性指标（低周疲劳寿命与应力幅阈值）^[1]。(3) 合规标准与行业规范方面，须严格遵循《特种设备安全监察条例》、GB/T150《压力容器》及 TSG21《固定式压力容器安全技术监察规程》等要求，在设计、制造、安装及使用各环节中确保安全系数选取和检验验收规范达标。

1.2 设备本体结构与材料对安全性能的影响

(1) 结构设计缺陷（如开孔补强不足、封头形状突变）及焊接工艺瑕疵（未焊透、气孔、夹渣、裂纹）会引发局部应力集中，显著降低设备承载裕度并成为断裂源点。(2) 金属材料材质（如铬钼钢、不锈钢的合金

成分与晶粒度）及热处理工艺（正火、淬火+回火）直接决定设备蠕变强度和抗疲劳性能，不当工艺将劣化晶界组织并降低持久强度。(3) 材料在长期服役中因老化（珠光体球化、石墨化）、磨损（冲蚀减薄）及腐蚀（应力腐蚀开裂、氢致开裂）导致有效壁厚递减、韧性下降，安全性能呈现服役时间相关的衰减规律。

1.3 运行工况与环境因素对安全性能的影响

(1) 压力、温度的频繁波动或超温超压等极端运行工况，会加速材料蠕变损伤和低周疲劳累积，削弱设备结构承载能力。(2) 潮湿大气、酸碱介质、高温烟气等外部环境因素，易引发电化学腐蚀、晶间腐蚀及高温氧化，加速设备表面劣化和应力腐蚀开裂进程。(3) 长期超负荷运行或频繁启停等不规范操作，会导致交变应力幅增大并加速疲劳裂纹萌生与扩展，对设备安全性能造成不可逆的损耗。

1.4 运维管理因素对安全性能的影响

(1) 日常巡检与定期检测（壁厚测定、无损探伤）不到位，将使早期腐蚀减薄、裂纹萌生等隐患无法及时发现，造成性能缺陷持续累积并逐步逼近失效临界点。(2) 维修保养不规范（如焊补工艺未经评定）及零部件更换不当（材质或规格不符），易引入新缺陷并破坏设备整体安全性能。(3) 安全管理制度不完善（如缺乏应急预案）与操作人员专业能力不足（判断失误或处置失当），显著增加人为误操作风险，直接影响设备运行本质安全水平。

2 承压类特种设备常见安全性能故障及机理分析

2.1 设备结构性失效故障及机理

(1) 设备塑性变形、开裂故障的产生原因与演化

机理。超压运行或高温蠕变使材料应力水平超过屈服极限,引发整体或局部塑性失稳,表现为鼓胀、塌陷等宏观形变。开裂故障源于材料冶金缺陷、应力腐蚀或低温脆性转变,微裂纹在晶界或夹杂物处萌生,在持续载荷驱动下沿有利取向扩展,最终贯穿壁厚形成泄漏通道或失稳断裂。(2)焊缝开裂、接口泄漏等连接部位失效的故障机制。焊缝区域因热循环作用形成粗晶组织和残余拉应力,在焊接缺陷(气孔、夹渣、未熔合)基础上,氢致延迟裂纹或再热裂纹在运行应力驱动下启裂扩展。接口泄漏则源于法兰密封面损伤、垫片老化压缩回弹量不足或螺栓预紧力松弛,导致密封比压局部低于介质工作压力,引发微渗漏并逐渐扩大^[2]。(3)结构疲劳损伤引发的设备性能衰减与突发性失效风险。在压力循环、温度波动或机械振动交变载荷作用下,结构应力集中部位累积塑性应变,疲劳裂纹经历萌生、稳态扩展和快速断裂三个阶段。疲劳损伤具有隐蔽性强、累积性突出的特征,性能衰减在前期难以通过常规手段检出,当裂纹达临界尺寸时即发生突发性低应力脆断,灾难性风险极高。

2.2 材料性能劣化类故障及机理

(1)均匀腐蚀、点蚀、应力腐蚀等腐蚀类故障机理。均匀腐蚀表现为壁厚整体减薄,电化学溶解速率均匀,遵循法拉第定律。点蚀发生在钝化膜薄弱处,蚀孔内自催化酸化加速溶解,纵深发展形成贯穿性穿孔。应力腐蚀在拉应力、敏感材料和特定腐蚀介质三者协同作用下,产生沿晶或穿晶脆性裂纹,断裂前无明显塑性变形预兆。(2)材料氧化、蠕变老化导致的设备承压性能下降问题。高温环境中金属原子扩散加速,表面生成氧化层并反复剥落减薄有效壁厚。蠕变过程中晶界滑移、空洞形核聚集,持久强度随服役时间呈指数衰减,高温承压部件出现蠕变伸长率超标或持久断裂,承压裕度显著降低。(3)材料疲劳磨损引发的设备密封性、稳定性失效机制。交变接触应力使密封副表面产生微动磨损或接触疲劳剥落,表面粗糙度增大、配合间隙改变,密封比压分布不均引发泄漏。磨损脱落的硬质颗粒在密封面间形成磨粒,进一步加剧表面损伤,使密封稳定性和可靠性持续劣化^[3]。

2.3 运行异常引发的功能性故障及机理

(1)压力、温度失控引发的设备过载失效故障。压力控制系统失灵或安全泄放装置拒动,使运行压力超过设计压力,薄壁区域产生塑性垮塌或爆破。温度失控导致材料强度随温升下降,同时热膨胀受阻产生附加热应力,叠加内压后加速蠕变和热疲劳损伤进程。(2)介

质堵塞、流通异常导致的设备运行工况失衡问题。介质中杂质沉积结垢或异物堵塞流道,引起局部流速过高冲刷减薄或过低导致过热结焦,破坏传热平衡,引发局部超温、振动或水动力不稳定,严重时导致爆管或设备烧损。(3)辅助配件失效引发的设备整体安全性能下降故障。安全阀整定压力漂移或阀瓣卡涩导致超压时无法开启泄放;压力表、温度计示值偏差误导操作判断;紧急切断阀内漏外泄造成系统隔离失效,这些附件功能丧失直接削弱设备安全防护能力,增加重大事故风险。

2.4 典型故障案例溯源与性能失效规律总结

(1)典型承压设备安全事故案例故障溯源分析。某热电厂锅炉水冷壁爆管源于长期局部热负荷过高叠加垢下腐蚀,壁厚减薄至临界值后蠕胀破裂。某合成氨反应器法兰泄漏追溯至螺栓预紧力不均和垫片材料选型错误。某输气管道环焊缝开裂由焊前预热不足引发氢致裂纹扩展所致。(2)不同类型设备安全性能失效的共性规律与差异化特征。共性规律为:应力集中部位、材料缺陷区域和腐蚀环境敏感区是失效优先起源点。差异性表现为锅炉以热疲劳和蠕变失效为主,压力容器以应力腐蚀和脆性断裂多见,压力管道则以焊缝开裂和冲刷减薄最为突出。(3)故障演化与安全性能衰减的阶段特征总结。性能衰减可分为三个阶段:初始阶段为微观损伤萌生(晶界位错堆积、腐蚀微孔形成),性能指标无明显变化;发展阶段为宏观缺陷形成(裂纹扩展、壁厚减薄),可通过无损检测发现;临界阶段为剩余强度不足,缺陷快速失稳扩展至最终失效。各阶段识别依赖于针对性检测策略,及早干预可有效阻断故障演化链条。

3 承压类特种设备安全性能提升与防控策略

3.1 设备设计与制造阶段安全性能优化策略

(1)优化设备结构设计,规避结构性应力集中隐患。采用有限元数值模拟技术对壳体开孔补强、封头过渡区及支座连接处进行精细化应力分析,优化几何构型以降低局部应力集中系数。对高应力区实施局部增厚或设置应力释放槽,确保一次应力与二次应力叠加值控制在许用极限以内,从设计源头消除薄弱环节。(2)优选高性能材料,提升设备耐腐蚀、抗疲劳综合性能。根据服役介质温度、压力及腐蚀特性科学选材,湿硫化氢环境选用抗氢致开裂钢种,高温工况选用含铬钼耐热钢并控制晶粒度与蠕变强度,低温环境选用足够冲击韧性的材料。综合考虑断裂韧性及疲劳极限,合理确定腐蚀裕量和许用应力,保障全生命周期本质安全^[4]。(3)规范焊接、加工工艺,保障设备制造精度与本体安全性。严格依据焊接工艺评定编制工艺文件,优化坡口角度、预

热温度及焊后热处理参数。推广自动化焊接装备减少人为偏差,对 A、B 类焊缝实施百分之百无损检测。控制盖板成型精度,避免过度冷作硬化或过热组织晶粒粗大。

3.2 设备运行阶段安全性能检测与预警技术应用

(1) 无损检测、在线监测等先进技术在性能检测中的应用。推广相控阵超声成像、数字射线自动评定、衍射时差法超声及声发射实时定位等技术,实现缺陷精确检出与定量评估。部署在线壁厚监测、分布式光纤测温及振动频谱分析系统,构建覆盖关键部位的实时传感网络,为状态评估提供连续可靠数据。(2) 基于大数据的设备安全性能实时预警模型构建。整合设计参数、制造记录、历史检测数据及运行工况构建标准化数据库。运用机器学习算法建立性能退化趋势预测与异常模式识别模型,监测指标偏离安全包络时自动触发分级预警,推动维修模式从定期检修向预测性维护转变。(3) 定期性能校验与隐患排查的标准化实施流程。制定涵盖测厚、表面检测、体积检测及耐压试验的组合检验方案,明确检验周期、测点布置及评定准则。建立隐患治理闭环管理流程,包括排查发现、分级评估、整改实施及复核验收各环节,确保全过程可追溯。

3.3 设备运维保养与性能修复技术优化

(1) 规范化日常运维保养流程,延缓设备性能衰减。编制覆盖运行巡查、润滑管理、防腐层维护及排污操作的标准作业指导书,明确技术参数与执行频次。建立设备技术档案,动态更新运行参数、维护履历及检测报告,实现运维全过程痕迹化标准化管理。(2) 针对性腐蚀修复、疲劳损伤修补技术的应用。均匀腐蚀减薄采用堆焊或复合板贴衬修复;局部点蚀采用打磨清理后补焊或高分子复合材料填充;冲刷磨损区域进行耐磨涂层热喷涂处理。疲劳裂纹选用打磨消除或焊接修补,修复后实施消应力热处理并进行全面无损复验^[5]。(3) 老旧设备性能评估与升级改造方案。基于合于使用评价原则开展剩余寿命评估,综合考虑剩余壁厚、材料劣化程度及裂纹扩展速率判定续用可行性。对合格设备实施筒体局部更换、传热管替换、安全附件更新或增设防腐内衬等改造,有效延长安全服役周期。

3.4 安全管理体系完善与风险防控机制构建

(1) 健全特种设备全生命周期安全管理制度。构建涵盖设计审图、制造监检、安装验收、使用登记、定期检验及报废注销的全流程可追溯管理体系,明确各环节质量标准和责任主体。推广数字化管理平台,实现台账电子化、检验智能提醒及信息动态共享。(2) 强化操作人员专业培训与安全操作规范管控。建立分级分类培训体系,定期组织操作规程、风险辨识、典型案例及应急响应等模块化课程。严格落实持证上岗及技能复考机制,确保人员具备风险识别、异常判断和初期处置能力,杜绝人为误操作。(3) 建立设备安全风险分级管控与应急处置机制。应用风险矩阵法科学分级,高风险设备提级监管并加大检测频次。编制专项应急预案并组织实战化演练,确保泄漏、超压、火灾爆炸等突发事件响应迅速、处置得当,最大限度保障安全。

结束语

本文系统剖析了承压类特种设备安全性能的影响因素、典型故障机理及性能衰减规律,明确了设备全生命周期各阶段的安全隐患成因。从设计制造、智能检测、运维修、安全管理四个维度,构建了全方位的安全性能提升与风险防控体系。研究证实,设备安全管控需立足源头优化、过程监管、事后修复全流程。未来可结合大数据、智能监测技术,进一步优化预警模型,持续提升特种设备本质安全与智能化管控水平。

参考文献

- [1] 彭恒,何思翹,赵加清,等.高温承压设备分析设计方法研究进展[J].特种设备学报,2026,1(03):146-151.
- [2] 王永可.承压类特种设备安全性能影响因素与风险评估方法研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(05):187-193.
- [3] 钱义刚.承压类特种设备典型缺陷成因及对安全性能的影响研究[J].机械强度,2023,45(04):962-967.
- [4] 刘松林.承压类特种设备全生命周期安全性能风险管理研究[J].安全与环境学报,2025,25,15(02):78-84.
- [5] 田志勇,许泽阳,张国晋.在线检测技术在承压设备安全性能评价中的应用[J].中国特种设备安全,2024,40(S2):19-22.