

压力容器全生命周期疲劳损伤评估与安全管理策略研究

鲁智慧

中汽研汽车检验中心(常州)有限公司 江苏常州 213161

摘要: 伴随工业设备长期服役状况的发展,对安全性及可靠性的要求渐次提升,对压力容器疲劳损伤管理成保障工程安全运行关键,本文对压力容器在全生命周期内有关疲劳损伤机理、寿命预测、在线监测、数字孪生及风险导向检维修策略等内容进行系统钻研,形成一套完整的疲劳评估及安全管理技术系统,凭借导入现代传感手段、大数据分析以及智能诊断途径,实现了由被动式检修到主动式预防的跨越,研究所得对提高压力容器安全运行表现、延长服役时间且推动法规标准优化有重要实践意义。

关键词: 压力容器; 疲劳损伤; 全生命周期管理; 风险评估

关键的承压设备——压力容器,频繁应用于能源、化工、航空等行业之中,其运行安全性直接关乎系统稳定与人员安危,伴随服役时长增加与工况渐趋复杂,疲劳损伤状况日益凸显^[1],以往周期性检修方法,难以满足当下现代工业设备精准、智能管理所需,急需构建以全生命周期为引领的疲劳评估与安全管理体系。依靠无损检测技术、大数据平台跟 AI 算法的进展,给压力容器疲劳行为的辨别与剩余寿命的估算提供新方案,本文着重探索先进技术在疲劳损伤预警和风险控制这两方面的集成应用,促使压力容器管理从经验主导转向数据引领与科学抉择。

1 压力容器疲劳损伤机理与影响因素分析

压力容器服役期间,屡屡处于载荷周期性转换的环境里,尤其是处于高温、高压环境下,或是腐蚀性介质的工况,极易引发疲劳破坏,疲劳损伤显示材料受循环应力作用的阶段,历经微裂纹起始、延展直至破裂的进程,该主要机理囊括低周疲劳(LCF)与高周疲劳(HCF)这两种类别,前者在高应变、低循环次数的加载情形下发生,后者则呈现于低应力、高循环次数的环境下^[2],相当多的疲劳裂纹源自应力集中之处,就如焊缝、锐角、螺栓的孔洞还有表面的瑕疵等微结构不连续区域。

诸如材料特性、载荷特征、环境条件和制造工艺等关键因素影响疲劳损伤,材料屈服强度、延展性能、组织结构及热处理的状态,显著左右疲劳寿命,尽管高强度钢有着较好的承载本领,但通常疲劳性能对缺陷以及微裂纹更敏感,载荷幅值、循环次数、波形、加载速率和载荷比(R值)共

同促成了疲劳响应特征的形成。对比恒定循环,变载荷循环(如出现频繁启停)更易引发材料损伤的加剧,服役时面临的诸如高温、腐蚀、氢脆等环境,会加速裂纹的扩展推进进程,引起材料抗疲劳性能的减退,尤其在湿度较大或呈酸性的环境里,腐蚀跟应力耦合起来,造就“腐蚀疲劳”的局面,加剧对结构安全的潜在威胁。

2 疲劳寿命预测与评估方法

压力容器安全评估中,疲劳寿命预测为关键一环,意在借助合理模型与测试方法,评估容器在服役阶段大概承受的疲劳循环频次,预测该容器潜在的失效时段范围,由此制定具有科学性的检修与替换方案,当下普遍采用的疲劳寿命预测方法主要涵盖实验法、理论法与数值仿真法三大类。

最古老传统的方式是借助S-N曲线(应力-寿命曲线)进行疲劳评估操作,此方法借助对材料开展不同应力水平的疲劳试验,得出应力与疲劳寿命的相互关系,用以判断实际工况应力所处情形下的剩余寿命,S-N曲线法未将裂纹扩展过程纳入考量,难以精确揭示结构内部损伤的演变机理^[3]。

伴随计算能力的稳步提高,有限元分析(FEA)慢慢成为疲劳寿命预测方面的主流技术了,采用建立三维容器模型,然后输入真实载荷状态,能模拟出应力场的分布状况与裂纹的扩展路径,精准锁定高风险地带,又与Miner线性损伤累积法相结合,开展多载荷施加下疲劳寿命的叠加析研。

3 安全监测与结构健康管理技术

3.1 在线监测技术与传感器系统

伴随工业装置大型化以及高风险设备的普遍应用,压

力容器在线监测技术逐步成为保障其安全运转核心手段，在线监测系统借助布置多种传感器，好比应变片、声发射相关的传感设备、超声波相关的检测工具、光纤布拉格光栅(FBG)之类，实时采集运行状态下容器结构所受的应力、变形、温度和振动等参数数据，可将这些传感器安排在高应力区域、焊缝周边或疲劳关键的点，达成关于疲劳载荷及早期损伤的实时感应。

应变传感器可对局部应力变化实施监测，展现结构疲劳的累积情形；声发射技术凭借裂纹扩展形成的弹性波进行早期裂纹的鉴别，可针对微裂纹萌生阶段实施预警；超声以及 TOFD 技术可周期性针对容器内部结构做完整性检测，消除局部监测存在的盲区，先进的无线传感器网络(WSN)跟物联网平台相结合，实现远程监控连同数据集中管理，大幅增进监测系统效率和智能化层级。

3.2 健康诊断与剩余寿命预测方法

结构健康诊断乃实时评估压力容器安全状态的关键环节，重点是辨认结构是否出现疲劳损伤，进而预判其未来极有可能的失效情形，健康诊断主要是基于多源监测数据去实施，把疲劳损伤模型跟机器学习算法组合起来，对容器疲劳劣化进程做建模及评估。

常用的诊断技术涉及基于应力 - 寿命曲线(S - N 法)开展起来的疲劳累积分析、裂纹扩展速率(da/dN)模型，再则是依据声发射信号或者超声反射信号的损伤识别算法，以监测实际载荷跟循环次数为途径，凭借 Miner 法则开展疲劳损伤累积度的核算，与临界损伤值比对此判断当前健康状况。

从剩余寿命预测这个角度看，能用断裂力学模型(如 Paris 公式)估算裂纹扩展阶段的寿命；诸如贝叶斯预测、马尔可夫链之类的统计方法，也开始在容器寿命不确定性建模中得到应用，深度学习模型处理大规模历史运行数据时表现极佳，可借助训练疲劳演化模型来预估未来一段周期中的疲劳态势。

3.3 基于大数据的疲劳行为识别

处于压力容器长周期运转的阶段里，产生诸多工况监测数据，为疲劳行为分析提供充足的数据来源，依靠大数据技术实现的疲劳行为识别，意在借助数据挖掘、模式识别与人工智能等途径来达成，挖掘关键疲劳特性，完成对复杂疲劳损伤进程的动态把握。

借助采集与预处理应力、应变、温度、振动等维度的监测数据，造就统一的数据规范架构，去除异常及噪声形成的干扰，凭借聚类分析、主成分分析(PCA)等方法甄选出典型疲劳工况模式，探究结构于不同工况环境下的疲劳响应线路。

诸如支持向量机(SVM)、随机森林(RF)和卷积神经网络(CNN)等机器学习模型，可实施训练识别疲劳损伤关键表征，诸如周期性裂纹的逐步扩展、异常应力的超高峰值、变载荷的猛然突变等，自主甄别潜在的风险情形，部分系统额外采用了自适应学习机制，可在数据累积时段持续优化识别的精确水平。

借助大数据平台的部署实施，能把传统静态疲劳分析转化为动态、连续不断的行为识别架构，极大提高了容器安全管理在智能、精细与前瞻方面的水平，大数据分析还可以跟数字孪生平台深度结合，做到疲劳行为虚实互动式的感知与预报。

3.4 数字孪生在疲劳管理中的应用

身为新兴技术的数字孪生，显示物理实体跟其虚拟模型之间存在的动态映射关系，其于压力容器疲劳管理里的应用正逐步地拓展，将容器几何结构、材料性能、运行数据及环境参数映射到虚拟空间里，构建一个可实时变动、动态互联的“数字镜像”，借此实现对疲劳状态的精准模拟与预先判断。

压力容器凭借数字孪生系统融合有限元仿真模型、在线传感数据与疲劳寿命预测算法，可即时体现结构健康情形，且动态推进其疲劳损伤进程，系统可依靠输入实时载荷跟历史运行工况，实施对局部高应力区域的疲劳风险预警，且给出剩余寿命的估测结果。

借助数字孪生可开展多种运行方案的虚拟试验并进行疲劳响应分析，帮衬制定更出色的运行策略与维护方案，在构思某类启停频繁操作前，能依靠虚拟仿真来评定其对疲劳寿命的影响大小，事先谋划相应的管控手段，防止疲劳加速蔓延。

4 压力容器全生命周期疲劳损伤安全管理策略

4.1 生命周期疲劳风险识别与分级

压力容器全寿命周期要经历设计、制造、安装、运行、维护以及报废等不同阶段，各个阶段所面临的疲劳风险程度不一，开展全周期内疲劳风险的识别与分级事项，是实现系

统性安全管理的关键基础,疲劳风险识别主要依靠对多源数据的分析以及对典型疲劳失效模式的归纳整理,厘清高风险结构区域及关键操作工况状态,识别范围包含材料瑕疵、应力聚集区域、焊接水准、操作频率及环境侵蚀等影响要素,再把现场监测数据与历史运行资料综合起来做验证。

风险分级基于疲劳损伤出现的概率与后果的严重程度做分类,经常采用风险矩阵法、模糊综合评判等途径,将风险等级分成高、中、低三级,像多次启动与停止过程中接管焊缝、循环压力波动强烈过渡段之类高风险区域,应作为重点监察与优先整治对象。

4.2 基于风险的检维修策略制定

以往压力容器检维修大多依靠固定时段与人工经验,有资源虚耗及难以动态处理疲劳问题的缺陷,依托风险的检维修策略(Risk - Based Maintenance, RBM)强调把疲劳风险评估结果当作核心要点,开展检修周期及资源分配的优化工作,实现“依需求保养”目的,处于疲劳管理阶段,RBM策略采用风险识别、概率模型构建以及后果审定等环节,厘定容器各部位检修的优先级序。

当进入具体实施阶段,对压力容器加以划分,得到若干结构单元,针对各单元开展疲劳寿命预估与剩余寿命测评,依照疲劳累积程度、损伤演进速率及其潜在失效后果,设定存在差异的检修预案,就有明显疲劳表征但还未失效的焊缝区域而言,不妨采用非破坏检测手段提升监测次数,对低风险区域而言,可适当把检修周期拉长,这般策略不仅加大了安全管理的精准力度,且极大降低了运营维护的花销。

4.3 安全评估结果在运维决策中的应用

疲劳安全评估不只是结构完整性评价所依赖的核心工具,也是引导运维决策的关键支撑依据,在压力容器运行的时段里,经由对疲劳寿命余量、损伤发展态势及关键失效隐患的测评,管理者可依此拟定更具科学性与合理性的运行策略及干预举措。

从运行的维度看,利用安全评估结果实现操作参数的优化,若评估结果说明,某操作条件(如频繁地启动停止或压力瞬间变化)会加速疲劳累积进程,运维人员可对对应的操作规程实施调整,以降低疲劳累积的推进速度,从检修角度看,评估结果可明确标定重点监控区域以及检测途径,由

此实现检测效率和精准度的增强,抑制资源的无谓浪费。

疲劳评估还能作为风险传递的佐证,设立管理层跟监管部门间的高效沟通机制,采用生成直观化报告与风险地图的方式,向监管部门展示容器运行的风险高低与已采用的管理办法,增强决策透明性及合规方面的表现,把数字孪生系统跟大数据平台整合,评估结果还可马上嵌入运维管理系统,引领从“静态记录情形”向“动态辅助决策情形”过渡。

4.4 法规标准对疲劳管理的启示

国际上像ASME(美国机械工程师协会)、EN(欧盟标准),国内《压力容器安全技术监察规程》《特种设备安全技术规范》等文件,都对疲劳设计与管理给出明确指引,这些法规与标准体系,为压力容器疲劳寿命设计、使用时的检测评估及维护修复等给予科学支撑,为疲劳损伤管理工作的开展提供了重要的借鉴意义。

设计阶段应充分把工况多变性和加载循环特征纳入疲劳寿命的考虑范畴,建议采用裂纹容限设计途径,且规定好疲劳分析的常规程序,部分标准逐步采用以风险为基础的评估思想,激励采用先进的监测诊断手段,增大管理的科学含量,标准持续拓宽对非传统损伤机制的识别范畴,好比将环境腐蚀疲劳与热机械疲劳纳入评价体系。

5 结束语

本文从疲劳损伤机理这个切入点开始,深度梳理出压力容器在设计、运行跟维护等阶段的疲劳风险特质,且给出借助大数据和智能监测技术的安全管理方案,利用生命周期内疲劳评估及动态风险分级操作,可极大提高容器安全管理的科学性及前瞻性。

参考文献:

- [1] 张思维,唐宇峰,李文杰,等.基于有限元和深度学习的高温压力容器安全评定[J].科学技术与工程,2024,24(33):14226-14236.
- [2] 蔡康健,徐巍,郭新然,等.物联网技术在瓶式高压储氢容器损伤监测中的应用[J].物联网技术,2024,14(11):7-8+11.
- [3] 雷艳.压力容器检验中的腐蚀与疲劳损伤评估与预测[J].冶金管理,2023,(21):76-78.