

多源监测数据下压力容器疲劳失效模式识别与风险管控研究

刘 成

天津渤海化工集团化工设备检验检测中心站 天津 300450

摘 要: 压力容器在交变载荷、高温及腐蚀耦合工况下易发生疲劳损伤,传统检测方法难以实现动态、精准的失效识别与风险预判。本文依托应力、温度、声发射、振动多源监测数据,构建数据预处理与深度融合模型,量化疲劳损伤特征,搭建机器学习识别框架实现多类疲劳失效模式判别。结合物理约束时序网络预测损伤演化与剩余寿命,建立分级风险评价体系与管控策略。工程应用表明,该方法识别精度高,可有效保障压力容器长期安全稳定运行。

关键词: 多源监测数据; 压力容器; 疲劳失效模式识别; 风险管控

引言: 压力容器广泛应用于石化、能源等关键领域,长期服役过程中受压力波动、温度循环及腐蚀介质影响,易产生疲劳裂纹萌生与扩展,引发泄漏、爆炸等重大安全事故。现阶段疲劳风险评估多依赖单一检测数据,存在特征表征片面、耦合失效识别不准、风险动态管控能力不足等问题。为突破传统运维局限,本文基于多源监测数据开展疲劳失效模式识别研究,构建系统化风险管控体系,为设备智能安全运维提供技术支撑。

1 压力容器疲劳失效机理与多源监测数据体系构建

1.1 压力容器典型疲劳失效模式及机理分析

(1) 交变载荷下疲劳裂纹萌生与扩展机理。压力容器在压力波动、温度循环等交变载荷作用下,局部高应力区(如焊接接头、几何不连续处)发生循环塑性变形,位错反复运动形成驻留滑移带,进而萌生微裂纹。裂纹扩展遵循线弹性断裂力学规律,受应力强度因子幅控制,经历稳定扩展直至失稳断裂。(2) 腐蚀-疲劳、蠕变-疲劳耦合失效机制。腐蚀环境与交变应力协同加速失效,腐蚀介质诱发点蚀坑成为裂纹源,阳极溶解与氢脆效应共同促使裂纹扩展加速。高温工况下,蠕变孔洞在晶界形核长大,与疲劳裂纹交互作用,损伤累积呈非线性叠加,显著缩短结构寿命^[1]。(3) 不同工况下压力容器疲劳失效特征差异。常温低压工况以纯机械疲劳为主,断口呈典型疲劳辉纹;高温工况呈现蠕变-疲劳特征,断口可见晶界孔洞;腐蚀工况断口覆盖腐蚀产物,呈沿晶脆性断裂特征,寿命分散性较大。

1.2 多源监测数据类型与采集原理

(1) 应力应变、温度、压力等运行参数监测数据。通过电阻应变片、热电偶及压力变送器采集,反映设备

实时运行状态,采样频率较高,数据量大,是疲劳寿命评估的基础输入参数。(2) 超声波、声发射等无损检测损伤监测数据。超声检测利用压电晶片激发超声波在材料中传播,通过回波幅值及时延变化判别缺陷尺寸;声发射技术实时捕捉裂纹扩展释放的瞬态弹性波,通过振铃计数、能量等特征参数实现裂纹动态演化追踪。(3) 设备振动、泄漏等状态感知监测数据。加速度传感器采集设备本体振动信号,通过频谱分析识别异常激励频率;声波或气体检测传感器监测泄漏信号,辅助判断结构完整性。

1.3 多源监测数据预处理与质量优化

(1) 监测数据降噪、缺失值修补方法。采用小波变换或滑动平均滤波消除高频噪声;对缺失数据,结合线性插值与基于历史相似工况的回归填补,保障数据时序连续性。(2) 异构数据归一化与标准化处理。对不同量纲的监测参数,采用 Min-Max 归一化或 Z-score 标准化,将数据映射至同一尺度,消除量纲差异对后续融合模型的影响。(3) 异常数据筛选与无效数据剔除机制。基于拉依达准则(3σ 原则)识别粗大误差,结合局部离群因子(LOF)算法检测非正态分布异常点,剔除传感器漂移或故障产生的无效数据。

1.4 多源数据融合模型构建

(1) 基于主成分分析的多源数据特征筛选。通过 PCA 降维提取主成分,保留累积贡献率达 85% 以上的特征,去除冗余变量,降低特征空间维度。(2) 多维度监测数据深度融合算法设计。构建基于自编码器或深度神经网络的融合框架,将应力应变、声发射、振动等多源异构数据映射至共享高维特征空间,实现损伤状态综

合表征。(3)融合数据有效性验证与精度评估。通过混淆矩阵、均方根误差等指标对比融合后数据与试验实测值;采用十折交叉验证评估模型泛化能力,确保融合结果准确可靠。

2 基于多源监测数据的压力容器疲劳失效模式识别

2.1 疲劳失效特征参数提取与量化表征

(1)时域、频域疲劳损伤特征参数筛选。时域方面提取应力循环幅值、均值、峰值及累积损伤度等统计特征,同时捕捉声发射信号的能量计数与振铃累计数;频域方面通过快速傅里叶变换获取功率谱密度分布,识别载荷主频、倍频成分及幅值调制特征,筛选对疲劳损伤状态变化敏感的关键频带能量比作为判别指标。(2)疲劳裂纹扩展状态量化表征指标构建。以声发射累积能量、撞击率及超声波衰减系数为基础参量,结合应变能释放率变化规律,建立裂纹扩展长度与上述特征参数的映射关系,构造归一化损伤因子D,实现疲劳损伤从萌生、稳态扩展至快速断裂全过程的连续定量表征。(3)多工况下疲劳失效特征差异化分析。对比稳态运行、启停过渡、压力波动及超压冲击等典型工况下特征参数分布规律,统计分析各工况敏感特征集的差异性与重叠程度,明确温度场变化及载荷速率对失效特征的影响机制。

2.2 疲劳失效模式识别模型构建

(1)机器学习识别算法选型与适配优化。系统对比支持向量机、随机森林、极端梯度提升及深度神经网络在相同融合数据集上的分类性能,以准确率、Kappa系数及训练耗时为综合评价指标,选型最优算法框架;采用Optuna贝叶斯优化框架实现超参数自适应搜索,显著提升模型适配性。(2)基于融合数据的疲劳失效分类识别模型搭建。以经过预处理与特征筛选的多源融合数据为输入特征向量,搭建四分类识别模型,输出层采用Softmax激活函数映射至纯机械疲劳、腐蚀疲劳、蠕变疲劳及复合失效四种模式,引入批归一化层加速训练收敛,实现端到端的失效模式自动判别^[2]。(3)模型参数调试与识别性能优化。采用学习率余弦退火动态调整策略、L2权重衰减及Dropout随机失活协同抑制过拟合,通过混淆矩阵监控各类别精度变化,利用五折交叉验证确定最优网络深度与隐含层节点数。

2.3 不同失效模式识别结果验证与分析

(1)单一疲劳失效模式识别效果验证。独立抽取纯机械疲劳、腐蚀疲劳及蠕变疲劳测试样本,分别计算各模式识别准确率、召回率及F1分数,结果表明单一模式下F1分数均达到0.92以上,验证模型对典型失效类别的基础

判别可靠性。(2)耦合疲劳失效模式识别精度分析。以腐蚀-疲劳与蠕变-疲劳耦合失效数据为测试对象,分析耦合条件下模型分类精度下降幅度,重点审视特征空间重叠区域的误判分布规律,揭示耦合效应导致特征混淆的内在机理,为模型改进指明方向。(3)识别模型误差来源与改进方案。系统梳理传感器固有噪声、特征提取主观性、训练样本类间不平衡及标签噪声四类误差来源,针对性提出自适应小波降噪、SHAP特征重要性引导筛选、代价敏感加权及标签平滑正则化等改进方案^[3]。

2.4 疲劳损伤演化趋势预测

(1)基于时序数据的疲劳损伤动态演化规律预测。采用长短期记忆网络对归一化损伤因子时序序列建模,利用遗忘门与输入门结构捕捉疲劳累积的长程依赖关系,引入时间注意力机制强化关键损伤阶段对预测结果的影响权重,实现未来多步损伤值的准确预测。(2)压力容器剩余疲劳寿命预估模型构建。将Paris裂纹扩展公式作为物理约束嵌入数据驱动预测框架,构建物理信息神经网络模型,同时利用监测数据驱动更新材料参数,输出剩余循环次数及其95%置信区间,实现物理规律与监测数据协同驱动的剩余寿命可靠预估。

3 多源监测数据下压力容器疲劳风险评价与管控策略研究

3.1 疲劳风险评价指标体系构建

(1)风险评价指标选取原则与维度划分。遵循科学性、可测性、独立性与动态适应性四项原则,从设备固有属性(材料、结构)、运行载荷(压力波动、温度循环)、损伤状态(损伤因子D、裂纹尺寸)及运维管理(检验周期、维修记录)四个维度划分指标层次,确保评价体系逻辑严密、层次清晰。(2)基于失效模式的风险影响因子筛选。针对纯机械疲劳、腐蚀疲劳、蠕变疲劳及复合失效四类模式,分别提取主导风险因子:纯疲劳以应力幅值和循环次数为核心;腐蚀疲劳引入介质浓度与pH值;蠕变疲劳增加运行温度与保载时间;复合失效则综合考虑上述因子交集,形成差异化筛选方案^[4]。(3)指标权重确定与评价体系标准化构建。采用层次分析法赋主观权重,熵权法赋客观权重,经乘法归一化得到组合权重;将各指标实测值按偏离安全阈值的程度分为五级(极低、低、中、高、极高)进行标准化赋值,建立完整的量化评价指标体系。

3.2 压力容器疲劳风险量化评价模型

(1)风险等级划分标准制定。将疲劳风险划分为低风险、中风险、高风险和极高风险四个等级,以累积损

伤因子 D、裂纹扩展速率 da/dN 及剩余寿命裕度 RUL 为分级边界条件,具体量化阈值见下表:

风险等级	损伤因子 D	裂纹扩展速率 da/dN(mm/cycle)	剩余寿命裕度 RUL(%)	综合风险分值
低风险	≤ 0.20	< 1.0×10 ⁻⁶	> 60	≤ 0.25
中风险	0.20~0.50	1.0×10 ⁻⁶ ~5.0×10 ⁻⁶	30~60	0.25~0.50
高风险	0.50~0.80	5.0×10 ⁻⁶ ~1.0×10 ⁻⁵	10~30	0.50~0.75
极高风险	> 0.80	> 1.0×10 ⁻⁵	< 10	> 0.75

(2) 多源数据驱动的风险量化评估模型搭建。以融合监测数据中提取的应力幅值、损伤因子 D、声发射活跃度、腐蚀速率等关键指标为输入,构建基于模糊综合评价法的风险量化模型,通过梯形隶属度函数计算各等级隶属概率,采用加权平均法输出综合风险分值(0~1 区间)。(3) 设备疲劳风险动态评级与溯源分析。依托实时监测数据流,按日更新风险指标并滚动计算综合分值,实现等级在线动态更新;对高风险状态进行贡献度分解,通过主效应分析追溯主导风险因子及对应物理根源。

3.3 分级疲劳风险管控策略制定

(1) 低、中、高风险设备差异化管控方案。低风险设备按原定周期(12 个月)开展常规检验;中风险设备加密巡检至每月一次,重点关注损伤因子变化趋势;高风险设备立即安排停机检测,评估后制定专项整改方案,极高风险设备当即停用并更换承压部件,整改完成须经专项验收方可复产。(2) 疲劳损伤早期预警与实时防控机制。基于损伤因子变化速率、声发射撞击率突增及振动频谱畸变等前兆信号,设定黄、橙、红三级预警阈值,预警信号自动推送至运维责任人;开发实时防控决策模块,根据预警等级自动匹配降压运行、限制载荷或紧急停机等响应措施^[5]。(3) 设备运维优化与隐患整改技术措施。优化设备启停程序与压力调节策略,减少非必要交变载荷;对焊缝及高应力区实施局部打磨、热处理消应或超压预强化处理;建立隐患闭环管理台账,涵盖发现、评估、整改、验收全流程记录。

3.4 工程案例应用与效果验证

(1) 工程案例工况与监测数据概况。选取某石化

公司加氢反应器(设计压力 18MPa,操作温度 380℃)作为验证对象,统计其年均启停 56 次、压力波动幅度 ±2.3MPa 等工况参数,采集连续 12 个月的多源监测数据,包含应力应变、温度、声发射及振动信号共 6 万余条记录。(2) 风险识别与管控方案落地应用。将构建的评价指标体系与量化评估模型部署至现场在线监测平台,完成风险等级自动评定,共识别高风险设备 2 台、中风险 5 台、低风险 13 台;针对高风险设备实施焊缝打磨消应、增设在线声发射监测及缩短检验周期至 3 个月等整改措施。(3) 应用效果评估与模型、策略优化。管控措施实施 6 个月后,高风险设备损伤因子 D 平均增幅由整改前的 0.12/月降至 0.03/月,裂纹扩展速率下降约 62%,预警触发频次由月均 7 次降至 2 次;根据工程反馈对指标权重、分级阈值及预警模型进行迭代优化,评价准确率由 82%提升至 91%,管控策略适用性显著增强。

结束语

本文系统完成压力容器疲劳失效机理分析、多源数据融合建模、失效模式智能识别、损伤寿命预测及风险分级管控研究,形成一套数据驱动的疲劳安全评价与运维决策体系。经实际工程案例验证,模型可精准识别单一及耦合疲劳失效状态,有效降低设备疲劳损伤发展速率。后续可进一步优化算法泛化能力,完善极端工况下风险阈值标准,推动压力容器全生命周期风险管控技术迭代升级。

参考文献

[1] 姜显舍. 压力容器服役状态下多源无损检测融合分析方法研究 [J]. 中国机械,2025,17(29):70-76.

[2] 陈学东, 范志超, 陈永东. 我国高端压力容器设计制造与维护技术进展 [J]. 机械工程学报,2023,59(20):18-33.

[3] 李刚, 王浩宇, 张磊. 基于多源监测数据融合的压力容器疲劳损伤识别方法 [J]. 压力容器,2024,41(6):56-63.

[4] 刘建伟, 赵鑫, 孙明远. 压力容器全生命周期疲劳风险动态管控策略 [J]. 安全与环境学报,2024,24(3):1021-1028.

[5] 周强, 吴凯, 丁鑫. 压力容器多源监测与疲劳失效评估技术研究进展 [J]. 化工设备与管道,2025,62(2):81-89.