

Research on fatigue life prediction and inspection standard of bucket metal structure

Hui Wang Yu Fang Ting Lou

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract

The service conditions of bucket wheel excavators are complex, making them prone to fatigue accumulation and hidden damage. This paper develops a fatigue life prediction method driven by stress spectra, integrating finite element modeling, hot spot identification, and strain life parameters to achieve local life estimation and fatigue zone division. It proposes a logic for setting life coefficients and controlling fatigue limits, establishing a hierarchical inspection process and early warning mechanism. Combining on-site data from the Huadian Electric Power Research Institute, the prediction model error is controlled within 8%, and the inspection standards can dynamically adapt to degradation trends. The verification method is highly practical and has engineering application value.

Keywords

fatigue life prediction; bucket crane structure; stress spectrum modeling; inspection standard; engineering verification

斗轮机金属结构疲劳寿命预测与检验标准研究

王辉 方瑜 楼挺

华电电力科学研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310030

摘要

斗轮机结构服役工况复杂, 易发生疲劳累积与隐性损伤。本文构建应力谱驱动的疲劳寿命预测方法, 集成有限元建模、热点识别与应变寿命参数, 实现局部寿命估算与疲劳分区划分。提出寿命系数设定与疲劳极限控制逻辑, 建立分级检验流程与预警机制。结合华电电力科学研究院斗轮机现场数据开展验证, 预测模型误差控制在8%以内, 检验标准可动态适配退化趋势, 验证方法实用性强, 具备工程推广价值。

关键词

疲劳寿命预测; 斗轮机结构; 应力谱建模; 检验标准; 工程验证

1 引言

斗轮机作为大型连续作业设备, 其金属结构长期承受变幅载荷、冲击振动与焊接残余应力作用, 面临高强度疲劳累积风险。结构疲劳破坏呈隐蔽性、突发性与不可逆性特征, 难以通过常规检修手段提前识别。现有寿命预测方法与检验策略多缺乏工况响应耦合、局部应力识别与标准转换机制, 制约了疲劳状态全生命周期管理的技术进展。斗轮机在复杂服役环境下的疲劳寿命精准评估及基于模型的检验体系构建已成为工程结构安全性研究的重要方向。

2 疲劳寿命预测方法体系与关键参数获取

2.1 应力谱构建方法

斗轮机在作业过程中承受多工况、多轴向变幅载荷, 具备典型疲劳响应特性, 应力谱构建需尽可能还原设备运行

中的真实载荷输入, 并提取构件等效应力幅。在臂架主段、回转平台支承区与斗轮传动连接区布设应变计与加速度计, 采集冲击、振动及惯量变化下的应力响应时间序列作为疲劳寿命建模输入。采集信号经带通滤波处理以剔除高频干扰后, 采用雨流计数法对应力历程进行载荷分段, 统计不同幅值与频率的应力循环数量。基于 Miner's 线性损伤累积原理, 将非规则应力载荷转换为统一等效应力谱, 并按 10^6 次标准循环数归一化, 便于与材料 S-N 曲线对应评估。考虑臂式结构各部位受力特征差异, 对典型构件如臂架中段主承力结构、连接铰座、回转支撑平台等建立工况等效载荷数据库, 按分类建模方式分别处理, 并绘制典型构件的应力幅与载荷持续时间双参数分布图谱, 为后续有限元边界条件加载与疲劳寿命预测提供数据支撑。

2.2 热点区域寿命预测策略

焊接节点与连接部位易形成裂纹, 应采用应力谱驱动的局部疲劳分析。通过多尺度建模提取载荷路径, 在局部区域细化网格至 1 mm, 确保应力集中与几何特征充分表达,

【作者简介】王辉 (1969-), 男, 中国浙江宁波人, 本科, 高级工程师, 从事机械检测研究。

用于识别疲劳热点并提高寿命预测精度。边界条件通过位移场映射技术由全局模型投影至子模型边界,实现耦合控制。材料选用 Q345D 钢与 Q420 钢,分别输入其 S-N 曲线参数与切线模量,焊缝区域引入附加应力集中系数 K_t 值范围 1.8~2.2,反映焊趾几何不连续引起的局部增强。采用变幅载荷驱动方式将构建的等效应力谱输入至模型,提取热点节点应力幅分布并统计最大主应力方向变化,结合 DIN EN 1993 标准定义的结构疲劳类别计算疲劳寿命。结果以安全寿命倍数表达,通过多点拟合方法构建寿命-载荷关系曲线,识别寿命低于 2×10^5 循环次数的高风险构件,输出裂纹易发区坐标与推荐加固方案。预测结果结合节点疲劳强度分级标准进行分区管理,预留风险控制数据接口供后续监测系统调用。

2.3 应变与断裂模型集成方法

高应变焊接区应引入应变寿命法与断裂力学法协同建模。Coffin-Manson-Basquin 方程用于描述低周疲劳行为,实验拟合参数为 $\sigma_f' = 850 \text{ MPa}, b = -0.08, \epsilon_f' = 0.6, c = -0.56$ 。Q420 钢与 Q345D 钢的试验数据通过等幅拉压试验获取。高周区采用 Basquin 公式修正弹性寿命,构建双区模型。断裂力学评估采用 Paris-Erdogan 公式,裂纹扩展常数 $C = 1.2 \times 10^{-12}$, $m = 3.2$,初始裂纹尺寸 $a_0 = 1.0 \text{ m}$, ΔK 由有限元法提取前沿应力场计算。将应变寿命法用于裂纹萌生阶段,断裂力学用于扩展阶段,形成统一寿命叠加模型。通过寿命区间分解集成两模型,分别求得起始寿命 N_i 与扩展寿命 N_p ,得出总寿命 $N_f = N_i + N_p$ 。模型输入参数由监测系统动态更新,支持基于物理机制的疲劳寿命实时预测,提升评估精度与在线响应能力。

3 检验标准构建方法与寿命评估判据设定

3.1 疲劳关键区识别与控制分区

斗轮机结构中多处连接节点与焊缝部位在长期变载荷作用下形成应力集中区,典型疲劳热点包括回转平台连接螺栓区、臂架铰接焊缝、臂架中段开孔结构及斗轮支臂根部焊缝。这些位置是裂纹可能起始的高风险区域,需优先识别并纳入分区控制,采用寿命等值线图作为判据,将高精度有限元模型中疲劳寿命低于设计寿命 25% 的区域划为一级疲劳关键区,25% 至 60% 之间划为二级控制区,其余区域为常规监控区。在关键区内结合应力梯度方向识别裂纹主扩展路径,参考焊缝形式与材料等级建立疲劳风险因子矩阵,对应设置不同的检验周期与触发响应等级。各分区主控物理量设为主应力幅、剪切应变幅与循环次数指标用作疲劳评估依据,分区边界划定中引入空间关联度分析法,对寿命突变区进行二维风险映射,确保划分具备结构连续性与响应一致性,为后续标准化检验策略提供逻辑支撑与参数基础。

3.2 寿命控制值设定方法

控制值基于 S-N 曲线、预测模型与服役应力确定。依

据热点应力幅与焊缝类别,匹配《EN 1993-1-9》和《GB 50017-2017》标准曲线,获取构件疲劳极限 σ_e ,作为疲劳判定与检验参数设定基础。将预测寿命结果中最短寿命值记作 N_{\min} ,设计目标寿命为 N_d ,则定义安全寿命系数 λ 为 $\lambda = N_{\min}/N_d$ 。一级关键区 λ 值控制在 0.2 以下,表示该区域实际寿命远低于目标寿命,需强制进行周期性检验与剩余寿命预测修正。二级控制区中 λ 值设置在 0.2~0.6 之间,作为次风险区域采用低频周期检验与趋势分析策略。常规区域 λ 值大于 0.6,采取监测数据异常触发型检验策略。为增强模型鲁棒性,引入失效概率 P 的概念,使用 Weibull 分布拟合寿命预测数据,设定 90% 置信水平下寿命下限 N_{90} 作为容许寿命下限值,补充原始 N_{\min} 指标,并将其作为分级管理的判定基础。控制值在应用中根据现场加载条件、监测系统响应能力和构件后处理工艺进行适度修正,形成基于预测模型主导的动态参数控制体系。

3.3 检验触发机制与预警分级标准

检验流程以预测驱动、分级响应构建闭环管理链。输入包括预测结果、数据异常与故障聚类。系统标记待检区域并触发动态检验,支撑疲劳精细化管控。一级区域每 3 个月检验,二级区域每 6 个月检验,常规区域不定期抽查。触发机制基于三重条件:寿命系数 λ 下降超 10%;应力幅连续 5 天高于 75% 疲劳极限;局部载荷峰值异常且无应力释放。任一条件满足即触发局部检验并生成待检列表。检验手段涵盖裂纹检测、声发射、无损评估与焊缝强度回评。结果反馈更新寿命模型,闭环修正预测路径。预警分级包括三级:一级为严重退化,立即停用更换;二级为可控退化,需加固或修复;三级为早期异常,建议缩短检验周期并持续跟踪。预警信息上传至数据库,供运维、设计与监理三方参考,实现结构退化的全生命周期可视、可控、可溯源。

4 工程应用验证与标准适配性评估

4.1 结构监测系统部署方案

华电电力科学研究院在沿海某燃煤电厂部署 DQ1000/3000 型臂式斗轮堆取料机结构监测系统。设备已服役 12 年以上,曾多次焊补维护,整体疲劳状态不明,裂纹预警困难。受海风腐蚀及运行载荷耦合影响,设备长期承受回转、俯仰与斗轮作业负荷作用,疲劳风险显著,监测需求紧迫。监测系统部署目标为:基于前述寿命预测与检验标准体系,构建高密度、多参数、智能化监测平台,实现对臂式斗轮机关键结构的疲劳应力动态监测与寿命状态评估,支撑设备预测性维修与运维调度优化。本系统在斗轮臂架主梁、回转平台底座、斗轮传动连接区、立柱焊缝节点等典型疲劳源位置布设共计 68 个应变测点,实时采集应力响应与位移协同变化。系统采用分布式无线应变采集节点,接入中央控制器并通过 4G 远程链路上传至数据中心,采样周期 10ms,结合寿命评估模型构建预测-实测融合平台。

4.2 实测应力与寿命模型对比

斗轮机臂架中段测点最大应力幅为 98.3MPa，平均 64.7MPa，应力频谱呈周期性波动，体现出回转振动特征。传动臂连接区峰值应力达 112.5MPa，存在短周期突跳，源于启动与制动冲击，应力集中严重。寿命模型基于 S-N 曲线与应力谱输入，预测臂架中段寿命为 3.6×10^5 次，传动连接区为 2.8×10^5 次，均低于设计寿命 5×10^5 次。依据 Miner's 规则，累积损伤系数分别为 0.84 和 0.96，表明两处区域已接近疲劳极限状态。误差分析显示模型预测与实测反演残差控制在 $\pm 8\%$ 内，具备良好适配性与工程可用性。局部如立柱底座连接焊缝区，模型寿命预测偏离实测推算值约 17%，原因是该处焊缝质量较差，存在加工缺陷，导致局部应力集中。模型未计入残余应力与制造误差，建议引入缺陷修正因子进一步提升预测准确度。关键部位应力与寿命对比如下表 1 所示：

表 1：关键部位应力与寿命对比

序号	部位	最大应力 (MPa)	平均应力 (MPa)	预测寿命 ($\times 10^5$)	损伤系数	误差 (%)
1	臂架中段主梁	98.3	64.7	3.6	0.84	6.5
2	传动连接焊缝区	112.5	73.2	2.8	0.96	7.3
3	回转平台螺栓孔	87.9	59.1	4.2	0.68	5.9
4	立柱焊缝连接区	105.4	69.5	3	0.79	16.8
5	框架边角节点	90.2	60.3	4	0.72	6.1

4.3 标准适配性分析与修正建议

实测与模型预测结果高度吻合，说明控制区划分与寿命参数配置有效，斗轮机臂架与连接焊缝属一级疲劳控制区

域，应力与损伤状态接近极限当前检验策略可有效反映趋势。部分区域如立柱底座出现预警滞后问题，建议引入焊缝残余应力与厚度修正参数补强模型鲁棒性。低幅疲劳区应纳入标准带宽范围避免过敏预警。建议采用区间双参数替代固定阈值，建立覆盖扰动响应的寿命控制带宽，在预警策略上应由单一应力幅阈值转为应力幅 + 循环频率 + 损伤率等多因子联合判断以提高触发准确率。针对臂式斗轮机焊缝复杂结构，建议标准中引入“可视裂纹长度”作为判据并配合声发射检测手段，构建融合力学响应、寿命退化与形态演化的三维疲劳识别系统提升适应性与检验动态性。

5 结论

研究建立了斗轮机结构疲劳寿命预测方法，基于应力谱构建、热点识别与寿命参数集成实现多尺度疲劳建模。提出了控制分区划分方法与寿命系数控制值设定逻辑，构建了面向工程应用的检验标准流程。结合华电电力科学研究院项目开展了现场验证，实测应力与预测寿命误差控制在合理区间，标准体系可有效匹配结构退化趋势。建议未来将预测误差建模、残余应力补偿与多源数据融合作为优化方向，支撑检验机制向动态化、自适应方向演进。

参考文献

- [1] 孙力. 斗轮机行走机构润滑系统改造的应用 [J]. 模具制造, 2025, 25 (02): 205-207.
- [2] 毛军. 发电厂煤场斗轮机数字化管理技术研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (02): 126-128.
- [3] 薛允涛. 斗轮机悬臂高精度电子皮带秤研发与应用 [J]. 衡器, 2023, 52 (08): 35-38.
- [4] 王军正. 巨型臂式斗轮机设计探讨 [J]. 建设机械技术与管理, 2023, 36 (02): 52-54.
- [5] 张琦昊. 斗轮机回转轴承损坏原因分析及维护策略 [J]. 中国设备工程, 2023, (04): 145-147.