

机械结构疲劳加载试验检测及疲劳寿命影响因素分析

余康杰

盐城松泽建筑机械安全检测有限公司 江苏 盐城 224000

【摘要】：特种起重机械长期承受循环载荷作用易发生疲劳损伤，直接影响其使用寿命以及使用安全性，对其主要受力部件进行疲劳加载试验可以反映该设备整体寿命情况，在不同载荷下对起重机金属结构及其主要组件疲劳损伤程度和失效模式进行研究，材料属性、外形构造、表层工况与载荷类型都会作用于疲劳寿命，各类条件互相交织形成内在关联。梳理疲劳加载环境和结构损伤成因的内在联系，能够完善设计方案，提升整体可靠度，支撑结构寿命测算工作开展，探究疲劳状态与寿命关联条件，能够为特种设备安全评定及法定检验周期内的维护方案制定提供理论支撑。

【关键词】：机械结构；疲劳加载；疲劳寿命；影响因素；耐久性

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.067

引言

特种起重机械一般承受起升、变幅、回转等频繁周期载荷，在长期工作过程中容易产生微裂纹并发展成疲劳断裂而失效，从而降低其可靠性和使用寿命。近年来由于工业装备向着高效、轻量化方向发展，使得结构疲劳问题越来越严重。特种起重机械以及其他行业的如航空、汽车、桥梁等领域对于运行安全性要求也不断提高，尤其是在国家强制性监管以及定期检验的情况下，疲劳性能是判断该类设备是否合格的主要依据。材料、构件形状、表面状况以及外力等因素都会对疲劳损伤有较大影响，即使是很小的变化都可能使寿命发生巨大变化。总结疲劳加载条件及其影响因素有利于了解疲劳损伤的发展趋势，也有利于进行改善设计、寿命预测以及提高安全性等研究工作。

1 机械结构疲劳概述

(1) 疲劳损伤的形成机理。特种起重机械的金属构件（如箱型梁、桁架臂）由于经常进行起升、制动等重复载荷作用，在焊缝、孔洞以及截面突变处容易出现应力集中而产生微观损伤，微裂纹在这些部位形成并沿着一定的方向扩展直至发展成为宏观裂纹。应力幅值大小、循环次数以及环境都会对裂纹扩展速度造成很大影响，高周疲劳裂纹扩展较慢，而低周高应变会加快其破坏过程；晶粒取向、内部缺陷和受力情况的不同也会引起不同的疲劳破坏方式从而使得结构强度逐渐降低甚至发生脆性断裂。疲劳损伤是不可逆且有累加性的，是导致结构破坏主要原因之一，对其机理的研究有利于提高产品的使用寿命以及对材料进行改进^[1]。

(2) 疲劳加载的类型与特点。针对起重机械的疲劳加载，主要模拟其典型工况，如恒定载荷的反复起

升（近似恒幅）、不同幅度货物的吊运（变幅）以及由风载、惯性力引起的交变振动（交变载荷）。恒幅工况应力波动稳定，材料受力均衡，裂纹生成与延伸规律；变幅工况载荷随时间波动，易形成局部应力峰值，加速裂纹生成延展；交变载荷使应力方向往复切换，促使材料内部形成交错裂纹。载荷频率与波形影响结构疲劳，高频易引发材料发热和动态形变，低频更贴合长期损伤累积规律，不同加载方式损伤表现不同，局部形变、裂纹生长速率及应力集中点位均有差异，梳理其特征可精准判定起重机械结构疲劳表现。

(3) 疲劳寿命的重要性与评价指标。对于特种起重机械，其疲劳寿命直接决定了法定检验周期内的安全运行能力，是制定维修、改造或报废决策的关键依据。循环次数、应力幅值及应变区间是界定疲劳寿命的关键参数，高周工况可承载数十万至数百万次载荷循环，低周高应变环境下运行时长大幅缩减。常用评判方式有 S-N 曲线、 ϵ -N 曲线及断裂力学参数，分别用于寿命预判、低周疲劳分析及裂纹扩展速率测算，材质属性、表层处理、外形构造及载荷特质均影响疲劳寿命，合理选用评判参数可支撑设备结构优化、剩余寿命测算及安全管控。

2 疲劳加载试验方法

(1) 实验设计与加载条件。特种起重机械的疲劳加载试验方案需根据相关标准（如 GB/T 3811）、工况谱进行编制，主要对主梁跨中、吊臂根部等重要部位进行加载，确定合理的应力幅值、循环次数、加载频率以及环境因素等。加载方式可为拉压交变、单向拉伸或扭转来反映实际情况。试件要考虑存在孔洞、缺口、焊缝等容易发生应力集中的位置以便使裂纹源更符合实际。温度、湿度以及腐蚀都会影响疲劳性能，在较高温度或者有腐蚀的情况下裂纹更容易发生扩

展。试验可以结合恒幅和变幅加载方式进行,通过改变起始应力大小以及载荷波形来代表真实的使用情况^[2]。

(2) 常用疲劳试验设备与技术。在特种设备检验中,液压伺服疲劳试验机用于对大型构件(如起重机主梁)进行疲劳试验,可以施加较大载荷较低频率的载荷模拟工况;而对小型重要零件(如吊钩、滑轮轴)可用旋转弯曲机或者专用疲劳试验机;振动疲劳装置复现结构运行过程中的多轴振动响应。应力、应变、位移三种调控方式可按试验需求灵活选用,高精度传感元件与数据采集装置全程捕捉应力、应变、位移动态变化,完整留存试验全程结构状态变化信息。

(3) 数据采集与误差控制方法。在特种设备安全检测中,疲劳试验的数据采集与误差控制直接关系到检验结论的准确性。全程需记录应力、应变、循环频次及裂纹生长动态,应变片、光学监测设备与数字化采集仪器为常规监测工具,应变片捕捉局部应变波动,光学设备追踪裂纹生成及延伸全过程,以无接触形式完成状态监测,依据加载节奏调配数据采集频次,规避关键信息缺失问题,同时让采集精细度契合试验标准。仪器精度、夹具装配、外界干扰均纳入误差管控范围,规避夹具附带受力干扰测量结果,多次重复试验、数据滤波处理、规范校验流程,能够弱化试验偏差,保障基于检测的疲劳寿命评定结果可信,数据整理环节融入统计分析手段,量化循环寿命分布规律与裂纹生长快慢,便于比对不同设备或构件的疲劳表现并归纳内在规律。

3 影响疲劳寿命的材料因素

(1) 材料性能对疲劳行为的影响。起重机械材料力学特质关联构件疲劳表现,抗拉强度、屈服强度、延展能力、硬度及弹性模量均属于核心参考参数,高强度材质可在高应力层级推迟微裂纹产生,放缓裂纹延伸节奏,拉长构件服役周期,具备良好韧性的材质在裂纹发展阶段吸纳更多能量,弱化脆性断裂发生概率,弹性模量改变应力排布与局部形变幅度,高模量材质高循环工况下更易产生应力集中,低模量材质依靠塑性形变缓冲局部应力峰值^[3]。疲劳极限体现材质承受循环载荷的能力,数值受材质组分、热处理方式及组织均匀程度制约,应变硬化表现与断裂韧性左右疲劳裂纹延伸进程,高断裂韧性材质可放缓裂纹沿晶界蔓延节奏,增强结构耐久水准。

(2) 材料缺陷与微观结构作用。材质内部瑕疵及微观组织状态左右构件疲劳寿命长短,微孔、夹杂物、非金属杂质与原生微裂纹均可形成应力集中点位,诱

发裂纹生成并加快延伸进程,缩减构件服役时长,晶粒规格与晶界特质左右裂纹扩散走向,细晶粒结构可阻滞裂纹延展,提升高周疲劳表现,晶界脆化特质会促使裂纹沿界面快速蔓延。相变组织、析出相与第二相颗粒排布方式改变局部受力状态,对裂纹演化产生促进或阻滞效果,加工工序留存的残余应力对裂纹生成存在双向作用,压应力推迟裂纹萌生进程,拉应力加快损伤叠加速度,材质微观瑕疵同宏观构造互相作用,衍生多元疲劳破坏形式,也为寿命精准预判增加难度。

(3) 表面处理与耐久性提升。材质表层状态关乎疲劳寿命长短,裂纹大多从表层瑕疵或应力集中位置开始生成,切削加工、磨削处理、喷丸强化、滚压成型及表层镀膜等方式,均可优化表层品质与应力排布,增强构件抗疲劳水准,喷丸工艺在表层形成压应力场,有效阻滞裂纹萌生与扩散,在高强钢材与铝合金构件中应用效果突出,滚压及表层强化工艺抹平细微表层缺陷,弱化局部应力集中现象,提升构件循环承载能力。镀层与薄膜结构既能隔绝外界腐蚀介质,又能减缓微裂纹生成速率,拉长结构服役年限,表层粗糙程度、加工残余应力及硬化层厚度,是评判表层处理成效的核心要素,各类处理工艺需匹配材质特质与实际工况统筹调整。

4 结构与几何因素分析

(1) 结构形状对应力分布的影响。构件几何形态决定载荷在实体上的传导状态,复杂轮廓布局易造成局部应力集聚,提升疲劳损伤发生概率,圆角、开孔、凹槽与窄截面等构造特征改变应力传导走向,部分区域承受高于常规水平的作用力,成为裂纹率先产生的位置,截面突变区域易集聚弯矩作用,加快微裂纹生成节奏,厚薄落差明显的截面与非对称构造承受往复载荷时受力状态失衡,疲劳裂纹顺着应力集聚方向延伸贯通,逐步形成宏观损伤痕迹^[4]。有限元手段可推演不同外形结构的受力排布,锁定关键受力点位与结构薄弱环节,为构造改良与局部加固提供支撑,外形调整既能削弱局部应力峰值,也可优化整体应力传导效率,提升构件承受循环载荷的耐久能力。

(2) 连接方式及应力集中效应。构件拼接形式左右整体疲劳服役时长,不同拼接构造会催生差异化的局部应力集聚状态,焊接、铆接、螺栓拼接等常用形式拥有各自独特的受力排布特点,焊接节点周边形成热作用区域并留存残余应力集聚,裂纹多自焊缝根部与边角位置生成,顺着节点走向持续延伸。螺栓拼接因孔壁与构件间摩擦作用形成局部应力集聚,同样会

成为疲劳裂纹的起始位置，铆接节点铆钉孔周边存在拉应力集聚，逐步诱发疲劳损伤产生，拼接构造改变局部刚度与形变能力，进一步调整内部受力排布，让裂纹延伸轨迹呈现非线性特征。

(3) 疲劳裂纹萌生与扩展规律。应力集聚点位与表层缺陷区域最易催生疲劳裂纹，细微纹路随载荷循环持续延展并演变为宏观损伤，应力幅值、循环频次与材质自身条件都会作用于裂纹演化状态，高应力层级会加快裂纹生长节奏，低应力层级下裂纹进程平缓且受微观组织约束，裂纹沿晶界或材质薄弱区域蔓延时轨迹不再平直，出现分叉与交错生长形态。局部塑性形变与接触面摩擦会偏转裂纹延伸走向，让裂纹生长节奏与外在形态更具多变性，疲劳裂纹演化分为初始萌芽、平稳延伸与快速失效三个阶段，各阶段呈现的生长特征为寿命推演提供参考标准，观测裂纹长度变化、生长速率及应力强度相关参数，能够搭建裂纹演化特征模型，为起重机械结构安全评定与局部加固处理提供参考。

5 载荷特性与寿命优化策略

(1) 载荷幅值、频率与循环特征。构件疲劳过程承受的载荷幅值、频率及循环特质，都会深度左右自身疲劳表现，高幅值载荷放大应力集中区域的塑性形变，加快微裂纹生成与延伸节奏，缩短构件服役周期；低幅值往复作用虽让损伤缓慢叠加，长期累积依旧催生裂纹成型，载荷频率牵动材料内部应力响应状态，高频工况易催生热效应与内部摩擦，改变微观组织固有属性，牵动裂纹生长速率产生波动；低频工况下构件受力状态更均衡，裂纹演化走势便于观测研判^[5]。载荷波形、平均应力水平及加载非对称状态构成循环特质，这类条件改变局部疲劳损伤累积快慢，波形突兀或带有峰值载荷的循环工况，更易促使裂纹提前产生。

(2) 优化设计与寿命延长方法。结构改良设计是拉长疲劳服役周期的核心途径，涵盖材质选用、外形调整、应力排布调控与表层强化等多个维度，规整截

面过渡形态并做圆角修整，能够削弱局部应力集中效应，推迟裂纹萌芽与后续延展进程，梳理载荷传导路径并调配刚度布局，提升应力流转效率，规避局部峰值应力集中出现。依托有限元仿真比对各类设计方案，预判构件在多样载荷环境下的疲劳响应，针对性完成关键位置加固修整，选材层面选用强韧兼备的材质，搭配喷丸、滚压、镀膜等表层强化手段，可切实提升构件抗疲劳水准，调控峰值载荷大小、适配循环波形与运行频率，弱化周期承载中的高应力冲击，同样能够拉长服役时长。

(3) 检测结果对安全检验与维护的指导意义。疲劳加载试验检测数据是特种设备定期检验以及安全性评价的重要参考。通过对被检测零件发生裂纹产生的位置、发展路径以及循环次数和应力幅值之间的关系进行观察可以定位出薄弱部位从而使得检验人员能够准确判断其级别并给出相应的修理或者减载意见。根据实验得到 S-N 曲线及寿命预测方法可以对设备剩余寿命进行合理估计进而安排好检修、维修以及淘汰时间点。所获得疲劳参数也可以用来改进受力情况、接头形式及表面处理等从而增强整个结构的抗疲劳能力还可以用于确定重要部件维护间隔时长、计算损伤累计程度以及预测损坏可能发生的时间从而加快维修速度。

6 结语

机械结构长期承受循环载荷易产生疲劳损伤，其形成机理、加载类型、材料特性、结构形状及连接方式均显著影响设备寿命，系统分析基于安全检测的疲劳加载条件、材料性能、微观缺陷及表面处理，可揭示起重机械关键结构裂纹萌生与扩展规律，为设备的安全检验、风险评估和全生命周期管理提供支撑。载荷幅值、频率及循环特征对疲劳行为影响关键，优化设计、改进选材与表面处理工艺，能有效延长寿命、提升耐久性，未来可结合先进数值模拟、传感监测及智能材料，实现疲劳寿命精准评估与动态管理，增强工程结构复杂工况下的安全性与可靠性。

参考文献:

- [1] 侯辉,陈明昊,刘爱超.机械结构优化下的水平井一趟多层喷砂射孔压裂技术[J].全面腐蚀控制,2025,39(12):324-326.
- [2] 黄睿捷.金属腐蚀机理及机械结构设计的防腐措施分析[J].中国机械,2025,(35):140-143.
- [3] 李治,毕丹.农业机械结构强度及疲劳寿命分析研究[J].农机使用与维修,2025,(12):43-45+49.
- [4] 姜驭勋,薛齐文,王弘平.基于载荷加载历史的高低周复合疲劳寿命预测模型[J].机械制造,2025,63(08):79-82+78.
- [5] 刘杜浩,姚卫星.复合材料层合板冲后剩余疲劳寿命预测的经验模型评述[J].飞机设计,2025,45(01):25-33.