

锻压机械机身结构疲劳损伤机理与基于载荷谱的寿命预测研究

潘祺钦, 郭洪昌, 蔡文忠, 郑炜嘉, 刘晓欢, 杨凯

浙江易锻精密机械有限公司, 浙江 宁波 315700

DOI:10.61369/ME.2025080027

摘 要 : 锻压机械机身作为设备承载与力传递的核心构件, 长期承受周期性动态载荷与瞬时冲击载荷, 易发生疲劳损伤并引发结构失效, 直接影响生产安全与设备服役寿命。本文以框架式热模锻压力机、立柱式机械压力机为典型研究对象, 系统分析机身结构的受力特性与疲劳损伤演化规律; 并结合材料疲劳性能参数与疲劳累积损伤理论, 提出适用于锻压机械机身的寿命预测流程, 通过分析, 旨在为机身结构优化、预防性维护及剩余寿命评估提供理论支撑与实践依据。

关 键 词 : 锻压机械; 机身结构; 疲劳损伤; 载荷谱; 寿命预测

Research on Fatigue Damage Mechanism and Load Spectrum-Based Life Prediction for Forging Press Frame Structures

Pan Qiqin, Guo Hongchang, Cai Wenzhong, Zheng Weijia, Liu Xiaohuan, Yang Kai

Zhejiang Yidian Precision Machinery Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315700

Abstract : As the core components for load-bearing and force transmission, the main frames of forging machinery endure long-term cyclic dynamic loads and transient impact loads, making them prone to fatigue damage and structural failure. This directly impacts production safety and equipment service life. This paper takes frame-type hot die forging presses and column-type mechanical presses as typical research subjects, systematically analyzing the stress characteristics and fatigue damage evolution patterns of frame structures. Integrating material fatigue performance parameters with fatigue cumulative damage theory, it proposes a life prediction process applicable to forging machinery frames. Through analysis, this study aims to provide theoretical support and practical basis for frame structural optimization, preventive maintenance, and remaining life assessment.

Keywords : forging machinery; frame structure; fatigue damage; load spectrum; life prediction

引言

在汽车制造、航空航天、冶金等重工业领域, 锻压机械通过机身结构将动力系统的能量转化为锻压力, 完成金属锻件的冲压、锻造、挤压等塑性成形过程^[1]。机身结构作为设备的“骨架”, 需同时承受设备自重、锻件反作用力、滑块往复惯性力及瞬时冲击载荷。长期服役后, 机身结构易因疲劳损伤出现裂纹、变形甚至断裂, 显著影响机身的寿命。传统研究多聚焦于机身静态强度计算, 忽略动态载荷下的疲劳累积效应; 同时, 寿命预测多依赖经验公式, 未结合实际工况载荷特征, 导致预测结果与实际偏差较大^[2]。因此, 深入揭示锻压机械机身的疲劳损伤机理, 建立基于实际载荷谱的寿命预测方法, 对提升锻压设备可靠性、降低运维成本具有重要现实意义。

一、锻压机械机身结构疲劳损伤机理

(一) 机身结构的受力特性

机身结构的受力状态直接决定疲劳损伤的起始位置与发展方向。框架式热模锻压力机机身由横梁、立柱、底座通过高强度螺栓连接构成, 主要承受垂直方向的锻压力与水平方向的侧向力。锻压时, 滑块下行对锻件施加压力, 锻件反作用力通过模具传递至滑块, 再经连杆、曲柄传递至机身横梁, 使横梁承受压力、立

柱承受拉力, 形成“拉-压”复合应力状态; 同时, 锻件变形不均会产生侧向力, 导致立柱出现弯曲应力。以16000kN热模锻压力机为例, 其单次锻压的最大垂直载荷可达18000kN, 水平侧向力约为垂直载荷的15%~20%, 且该载荷随锻件材质(如碳钢、合金钢)、成形工艺(如镦粗、拔长)的变化呈现周期性波动。

立柱式机械压力机机身由上横梁、立柱、工作台构成, 受力以垂直交变载荷为主^[3]。滑块在曲柄连杆机构驱动下做往复运动, 下行时机身承受锻压力产生的压力, 回程时承受滑块与模具

重力产生的拉力，形成“压-拉”交变应力循环。此外，滑块运动的惯性力会导致机身产生附加动应力，尤其在滑块加速下行与减速回程阶段，动应力峰值可达静应力的1.2~1.5倍，进一步加剧疲劳损伤风险。

无论是框架式还是立柱式机身，其应力集中区域均为疲劳损伤的高发部位，包括横梁与立柱的连接圆角、螺栓紧固孔、加强筋过渡处等。这些区域因结构截面突变，易形成局部应力集中，应力集中系数可达1.5~3.0，成为微观裂纹的首要萌生点。

（二）疲劳损伤的演化过程

锻压机械机身的疲劳损伤演化遵循“微观裂纹萌生—裂纹扩展—宏观断裂”的三阶段规律，各阶段的特征与机制存在显著差异^[4]。微观裂纹萌生阶段是疲劳损伤的起始环节，主要发生在机身材料的内部缺陷处（如晶界、夹杂、气孔）或表面应力集中区域。机身常用材料（如Q345钢、45钢）在交变应力作用下，材料内部的位错会发生滑移与堆积，当局部应力超过材料的屈服强度时，位错堆积形成微裂纹。该阶段持续时间较长，约占整个疲劳寿命的60%~80%，且微裂纹尺寸较小（通常小于0.1mm），难以通过常规检测手段（如目视检查、磁粉探伤）发现。例如，Q345钢机身在120MPa交变应力作用下，微观裂纹萌生需经历约 10^5 ~ 10^6 次应力循环，此阶段材料的力学性能（如硬度、弹性模量）无明显变化，但内部微观结构已发生不可逆损伤。

裂纹扩展阶段是微裂纹向宏观裂纹发展的过程，可分为“小裂纹扩展”与“长裂纹扩展”两个子阶段^[5]。小裂纹扩展阶段（裂纹长度0.1~1mm），裂纹扩展速率较慢，主要受材料微观结构与应力比（最小应力/最大应力）影响——当应力比增大时，裂纹扩展速率降低，反之则升高。长裂纹扩展阶段（裂纹长度大于1mm），裂纹扩展速率显著加快，且会沿垂直于最大主应力的方向扩展，在冲击载荷作用下可能出现“跳跃式”扩展。例如，45钢机身的长裂纹在锻压冲击载荷作用下，每月扩展量可达0.1~0.3mm，若不及时干预，裂纹会快速扩展至临界长度。

宏观断裂阶段是裂纹达到临界长度后，机身结构发生突然断裂的过程。当裂纹长度扩展至满足断裂力学中的“Griffith判据”时，材料内部的弹性应变能释放速率超过裂纹扩展所需的能量，裂纹会以极快速度贯穿整个结构，导致机身断裂。该阶段持续时间极短，通常仅需数次应力循环，且断裂前无明显塑性变形，属于典型的“脆性断裂”，对设备安全威胁最大。

为直观呈现疲劳损伤演化过程中裂纹长度与应力循环次数的关系，绘制图1所示的疲劳损伤演化曲线。曲线清晰展现了三阶段的特征：微观裂纹萌生阶段（循环次数0~ 10^6 次）裂纹长度增长缓慢；小裂纹扩展阶段（ 10^6 ~ 5×10^6 次）增长速率加快；长裂纹扩展阶段（ 5×10^6 ~ 8×10^6 次）增长速率急剧上升，最终达到临界长度（2mm）引发断裂。

（三）疲劳损伤的关键影响因素

锻压机械机身的疲劳损伤由多因素耦合作用导致，核心影响因素可归纳为材料特性、载荷类型、结构设计与使用环境四类。

材料特性决定机身抗疲劳能力，主要包括疲劳强度、韧性、纯净度与组织均匀性。疲劳强度越高，材料抵抗微裂纹萌生的能

力越强，如Q690钢疲劳强度（ 10^7 次循环）约280MPa，高于Q345钢的200MPa，可延长机身寿命40%以上；材料韧性不足会加快裂纹扩展，内部夹杂与气孔则会成为微裂纹“病灶”，降低疲劳寿命。

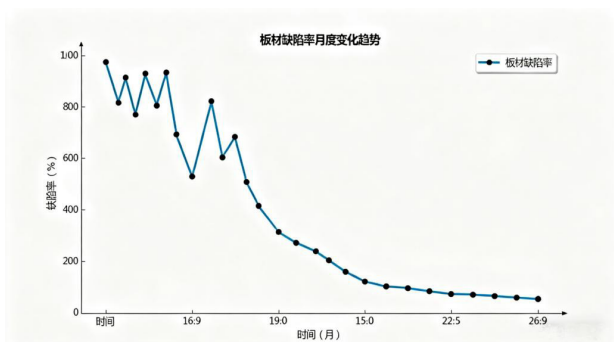


图1 板材缺陷率月度变化趋势

载荷类型与参数通过幅值、频率、应力比及冲击特性影响损伤；载荷幅值越大，微裂纹萌生越快；频率超过30次/分钟易引发共振，加剧应力集中；应力比越小，交变应力范围越大，损伤累积越快；冲击载荷会使机身局部应力骤增30%~50%，显著缩短裂纹扩展阶段寿命。

结构设计合理性影响应力分布，不合理设计会加剧应力集中。如横梁与立柱连接圆角半径小于10mm时，应力集中系数超过2.5，增至20mm可降至1.8以下；螺栓孔未倒角会形成尖锐应力集中，加强筋布置不均则导致机身受力失衡、局部应力超标。

使用环境通过腐蚀与温度加速损伤：工业环境中的湿气、粉尘及腐蚀性气体会造成机身表面腐蚀，形成的腐蚀坑会成为微裂纹萌生点，使寿命降低20%~30%；热锻车间高温则会降低材料疲劳强度，进一步加剧损伤。

二、基于载荷谱的机身疲劳寿命预测流程

（一）材料疲劳性能参数的获取

材料疲劳性能参数是寿命预测的基础，核心参数包括材料的S-N曲线（应力-寿命曲线）与疲劳极限，需通过材料疲劳试验获取^[6,7]。试验材料需与机身实际材料一致，例如Q345钢机身需选取同批次、同热处理状态的Q345钢试样，试样形状为标准疲劳试样，尺寸符合国家相关标准要求。试验设备采用电液伺服疲劳试验机，可实现变幅载荷与恒幅载荷加载，加载频率设为10~20Hz，应力比设为0.1（模拟机身的拉-压交变应力状态）。

试验过程需测试5~7个不同应力幅值水平（如180MPa、200MPa、220MPa、240MPa、260MPa、280MPa、300MPa），每个应力水平下测试3~5个试样，记录每个试样达到疲劳失效（出现0.5mm裂纹或断裂）的循环次数。将应力幅值（纵轴，对数坐标）与循环次数（横轴，对数坐标）拟合为线性曲线，得到S-N曲线，曲线需覆盖机身实际可能承受的应力范围，且低应力段需延伸至材料疲劳极限（ 10^7 次循环未失效的最大应力），对于低于疲劳极限的应力幅值，视为材料不会发生疲劳失

效,循环次数取 10^7 次。

为适应锻压机身的复合应力状态(如拉-弯复合应力),需将单向应力下的S-N曲线转化为多向应力下的“当量应力S-N曲线”。转化时采用“vonMises当量应力准则”,将机身关键部位的三维应力状态转化为等效单向应力,再代入单向S-N曲线,获取对应循环次数,确保应力状态与材料试验一致。

(二) 疲劳累积损伤的计算

疲劳累积损伤计算采用工程中广泛应用的Miner线性累积损伤理论,该理论假设“不同载荷水平下的损伤线性叠加,当总损伤达到1时材料发生疲劳失效”,计算过程简洁且符合工程实际需求^[9]。计算前需将构建好的程序载荷谱与当量应力S-N曲线关联,确定每级载荷对应的应力幅值与循环次数。设载荷谱包含k级载荷水平,第i级载荷的当量应力幅值为 σ_i ,通过S-N曲线查得该应力下材料的疲劳寿命为(即达到失效的循环次数),该级载荷在实际工况中的循环次数为,则第i级载荷产生的疲劳损伤。

机身的总疲劳损伤为各级载荷损伤之和,即总损伤=各级损伤相加。当总损伤达到1时,机身达到疲劳寿命,此时的总循环次数即为机身的疲劳寿命^[9](次循环)。若需将循环次数转化为年寿命,需统计机身每年实际承受的载荷循环总次数(可通过设备运行记录与载荷谱采集数据计算),则年寿命=循环寿命/年循环次数。

例如,某Q345钢机身的程序载荷谱包含5级载荷: $\sigma_1=280\text{MPa}$ ($N_1=10^4$ 次), $n_1=50$ 次; $\sigma_2=250\text{MPa}$ ($N_2=3\times 10^4$ 次), $n_2=100$ 次; $\sigma_3=220\text{MPa}$ ($N_3=1\times 10^5$ 次), $n_3=200$ 次; $\sigma_4=180\text{MPa}$ ($N_4=5\times 10^5$ 次), $n_4=300$ 次; $\sigma_5=150\text{MPa}$ ($N_5=2\times 10^6$ 次), $n_5=200$ 次。各级损伤分别为0.005、0.0033、0.002、0.0006、0.0001,总损伤=0.005+0.0033+0.002+0.0006+0.0001=0.011。若机身每年承受的载荷循环总次数为 1×10^4 次,则循环寿命= 1×10^4 次/0.011 $\approx 9.1\times 10^5$ 次,年寿命= 9.1×10^5 次/ 1×10^4 次/年 ≈ 91 年。

(三) 实际工况因素的修正

锻压机械机身的实际运行工况存在冲击载荷与恶劣环境,会加速疲劳损伤,需在疲劳累积损伤计算基础上引入修正,确保预测寿命更贴近实际。

冲击载荷修正需考虑冲击载荷对机身应力的放大作用与损伤的加剧效应。热模锻压力机的冲击载荷会使机身局部应力骤增,通常用“冲击系数”(冲击载荷峰值与静载荷的比值,一般为1.3~1.5)描述应力放大程度,冲击载荷对应的当量应力幅值=冲击系数 \times 常规载荷应力幅值。同时,冲击载荷的单次损伤较大,需单独计算其损伤,并引入“冲击损伤放大系数”,修正后冲击损伤=冲击损伤放大系数 \times 冲击载荷基础损伤,避免因忽略冲击影响导致预测寿命偏长。

环境因素修正主要针对腐蚀与高温的影响。工业腐蚀会降低材料疲劳强度,需引入“腐蚀修正系数”——常温干燥环境取1.0,潮湿腐蚀环境取0.7~0.85,具体取值根据环境湿度与腐蚀介

质浓度确定(如热锻车间油烟较多时取0.75)。高温环境会使材料疲劳强度下降,需引入“温度修正系数”——以25℃为基准,50℃时取0.85~0.9,80℃时取0.7~0.8,通过材料高温疲劳试验确定具体数值。环境修正后的当量应力幅值=常规应力幅值/(腐蚀修正系数 \times 温度修正系数),再代入S-N曲线计算疲劳寿命,确保环境因素对寿命的影响被充分考虑^[10]。此外,载荷顺序也会影响损伤累积,锻压机械机身常先承受预热阶段的小载荷,再承受正常锻压的大载荷,实际损伤略低于理论计算值,需引入“载荷顺序修正系数”(一般为0.85~0.95),修正后总损伤=载荷顺序修正系数 \times (常规载荷总损伤+修正后冲击损伤) \times (1/(腐蚀修正系数 \times 温度修正系数))。

综合上述修正,最终的锻压机械机身寿命预测流程为:

- (1) 构建机身实际工况的程序载荷谱;
- (2) 将载荷谱转化为当量应力谱,结合材料S-N曲线确定各级载荷的疲劳寿命;
- (3) 计算各级常规载荷的基础损伤与冲击载荷的修正损伤;
- (4) 引入载荷顺序修正系数与环境修正系数,计算总损伤;
- (5) 计算疲劳寿命:循环寿命=年循环总次数/总损伤,年寿命=循环寿命/年循环总次数。

为直观对比不同修正因素对寿命预测结果的影响,绘制图2所示的寿命修正系数影响曲线。以无修正时的预测寿命为基准(100%),曲线显示冲击载荷修正使寿命降至75%,环境因素修正使寿命降至60%,综合修正后寿命为50%,充分体现了实际工况因素对寿命预测的显著影响,也验证了修正流程的必要性。

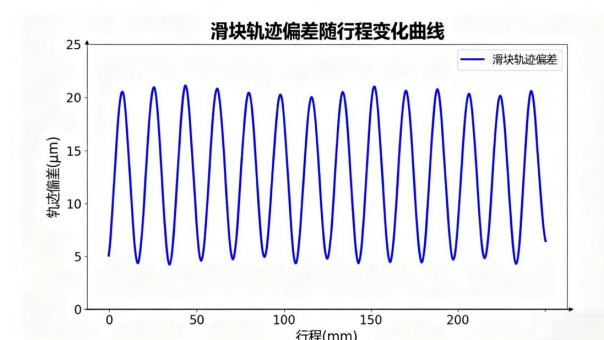


图2 滑块轨迹偏差随行程变化曲线

三、结语

本文通过对锻压机械机身结构疲劳损伤机理与基于载荷谱的寿命预测研究,得出以下核心结论:锻压机械机身的疲劳损伤遵循“微观裂纹萌生—裂纹扩展—宏观断裂”三阶段规律,应力集中区域是损伤高发部位,材料特性、载荷类型、结构设计与环境因素共同决定损伤演化速率——材料疲劳强度越高、载荷波动越小、结构应力分布越均匀、环境腐蚀与高温影响越弱,机身疲劳寿命越长;结合材料S-N曲线与Miner线性累积损伤理论的寿命预测流程,通过引入冲击载荷、环境因素、载荷顺序的修正系数,可有效降低预测偏差,为工程实践中机身寿命评估提供可靠方法。

锻压机械机身的疲劳损伤与寿命预测研究，不仅关系到设备运行安全与生产效率，还对锻压行业的绿色化、智能化发展具有推动作用——通过精准预测寿命，可制定科学的预防性维护计划，减少突发故障停机时间，降低备件更换成本，同时避免因机

身过早报废造成的资源浪费。未来需要进一步加强理论研究与工程实践的结合，将研究成果转化为可落地的技术方案，为锻压设备的全生命周期管理提供更有力的支撑。

参考文献

[1]王增云,于镇玮,朱元胜,等.现代热模锻压力机的性能特点及研究应用[J].锻造与冲压,2025,(15):30+32-33.
[2]孙兴悦,刘耘宇,马玉娥,等.基于数据-物理融合驱动方法的 Ti6Al4V 多轴疲劳寿命预测研究[J].固体力学学报,2025,46(05):571-588.
[3]韩洪元.转向器壳体轴承压装机的结构设计及试验研究[D].河南农业大学,2025.
[4]石家瑞.基于混凝土疲劳损伤本构模型的 CRTS III 型无砟轨道板疲劳性能研究[D].中南大学,2022.
[5]赵高乐,齐红宇,李少林,等.燃气涡轮发动机关键部件疲劳小裂纹研究进展[J].力学进展,2023,53(04):819-865.
[6]冯博,樊坤鹏,曹亚民.浅析医疗器械机械工程中的疲劳分析与寿命预测[J].中国设备工程,2025,(19):218-220.
[7]赵西锋,朱新喜,杨杰.引水隧洞双面螺旋缝钢管焊接节点疲劳性能试验研究[J].中国水能及电气化,2025,(08):31-35+41.
[8]朱晓东.微动疲劳寿命预测及若干防护策略研究[D].北京科技大学,2024.
[9]杜梓涛.轨道车辆车体结构随机振动疲劳仿真分析[D].大连交通大学,2025
[10]赖泰鸿.轨道车辆结构疲劳寿命评估系统开发与应用[D].大连交通大学,2025.