

铁塔构件冲孔加工模具寿命延长方案研究

陈天峰

浙江盛达铁塔有限公司 浙江 舟山 311232

摘要: 本文聚焦铁塔构件冲孔加工模具寿命延长方案。先分析模具失效模式与原因, 识别设计、材料、工艺、使用维护等全生命周期核心影响因素, 测算权重并分析交互作用。基于此, 从设计、材料、制造工艺、冲孔加工工艺、使用与维护等方面构建寿命延长方案, 整合优化形成全链条协同体系, 旨在提升模具寿命, 保障铁塔构件冲孔加工效率与精度。

关键词: 铁塔构件; 冲孔模具; 模具寿命; 工艺优化

引言: 铁塔构件冲孔加工中, 模具寿命直接影响生产效率与成本。当前, 模具因承受剧烈冲击载荷、接触应力, 且受构件表面杂质磨损、环境因素影响等, 易出现磨损失效、疲劳失效等多种问题, 导致寿命较短。这不仅增加换模频率与停机损失, 还提高全生命周期成本。因此, 研究铁塔构件冲孔加工模具寿命延长方案具有重要的现实意义。

1 铁塔构件冲孔模具失效分析

1.1 模具工作条件与失效模式

铁塔构件多为高强度钢材, 冲孔模具工作时需承受剧烈冲击载荷与接触应力, 且长期处于反复冲压的循环工况中, 同时面临构件表面氧化皮、杂质带来的磨损作用。模具工作环境温度虽无极端波动, 但冲压过程中的摩擦生热会导致局部温度升高, 加剧材料疲劳。常见失效模式主要包括四种: 一是磨损失效, 冲头与凹模刃口因长期摩擦出现尺寸磨损、刃口钝化, 导致冲孔精度下降、毛刺超标; 二是疲劳失效, 循环载荷下模具内部产生裂纹, 逐步扩展后引发断裂; 三是塑性变形失效, 冲击载荷超过材料屈服强度, 使刃口出现塌陷、变形; 四是崩刃失效, 刃口存在应力集中或材料缺陷时, 受瞬时冲击发生局部崩裂。不同失效模式往往相互关联, 磨损会加剧应力集中, 进而加速疲劳裂纹萌生。

1.2 失效原因分析

1.2.1 材料因素

材料自身性能是决定模具失效的核心基础因素。部分铁塔冲孔模具选用的合金工具钢碳含量配比不合理, 导致硬度与韧性失衡, 硬度不足易引发磨损, 韧性欠佳则易出现崩刃、断裂。材料纯净度不足, 内部存在夹杂、疏松、偏析等缺陷, 会成为应力集中点, 显著降低模具抗疲劳能力, 加速失效进程。另外, 材料热处理工艺适配性差, 若淬火温度不当、回火不充分, 会导致模

具内部残留内应力, 或出现马氏体组织不均匀现象, 使模具在工作中易发生变形或裂纹。同时, 模具表面涂层材料质量不佳或附着力不足, 无法有效阻隔摩擦与腐蚀, 也会缩短模具使用寿命, 加剧失效风险。

1.2.2 工艺因素

工艺环节的缺陷是模具失效的重要诱因, 贯穿模具制造与冲孔加工全流程。模具制造阶段, 刃口加工精度不足、表面粗糙度超标, 会导致工作时应力集中, 引发局部磨损加剧; 热处理工艺参数把控不当, 如淬火冷却速度过快、回火次数不足, 会使模具韧性下降, 易出现疲劳裂纹。冲孔加工环节, 工艺参数适配性差是关键问题, 冲裁间隙过大或过小, 会分别导致毛刺增多、模具负荷骤增; 送料精度偏差则会使模具承受偏载, 加剧局部磨损与变形。模具装配精度不足, 如导向机构间隙过大、定位装置偏差, 会导致冲压过程中模具受力不均, 进一步诱发失效, 降低模具整体使用寿命^[1]。

1.2.3 环境因素

环境因素虽不直接主导模具失效, 但会加速失效进程, 形成叠加影响。铁塔构件加工多在户外或半开放式车间进行, 空气湿度较高时, 模具表面易发生氧化锈蚀, 尤其刃口部位锈蚀会削弱结构强度, 加剧磨损。车间内的粉尘、铁屑等杂质附着在模具表面或进入冲裁间隙, 会产生磨粒磨损, 破坏模具表面精度。部分地区昼夜温差较大, 模具反复经历温度变化, 会产生热应力, 长期积累易引发微裂纹。冲孔加工中使用的冷却润滑液质量不佳、更换不及时, 会降低润滑效果, 导致模具与构件摩擦加剧, 同时劣质冷却液可能对模具材料产生腐蚀, 加速失效。

2 铁塔构件冲孔加工模具寿命影响因素识别与分析

2.1 影响因素识别的原则与思路

模具寿命影响因素识别需遵循系统性、针对性、可

量化三大核心原则。系统性原则要求全面覆盖模具设计、材料、制造、使用、维护等全生命周期环节，避免遗漏关键因素；针对性原则聚焦铁塔构件高强度、大批量加工的特性，重点关注与冲孔工艺、构件材质适配相关的因素；可量化原则确保识别的因素能通过技术手段检测、计量，为后续权重测算提供支撑。识别思路以失效机理为核心，先通过现场调研收集模具失效案例、使用寿命数据，梳理各环节潜在影响因素；再结合文献研究与行业经验，剔除次要、无关因素，保留核心影响因素；最后通过因果分析图、鱼骨图等工具，明确各因素与模具寿命的关联路径，为后续分类分析奠定基础。

2.2 核心影响因素分类与详细分析

核心影响因素按全生命周期维度分为四类：设计类因素，包括刃口结构设计、冲裁间隙匹配度、导向机构精度设计等，合理的刃口圆角与间隙可降低应力集中，延长寿命；材料类因素，涵盖模具基材性能、表面处理工艺、材料纯净度，优质基材与涂层能提升抗磨损、抗疲劳能力；工艺类因素，包含模具制造精度、热处理工艺、冲孔加工参数适配性，精准制造与适配工艺可减少模具负荷；使用维护类因素，涉及冷却润滑系统运行、定期检修频率、模具存储条件，规范维护能减缓失效进程。其中，冲裁间隙匹配度、热处理工艺、冷却润滑效果对寿命影响最为显著，需结合铁塔构件材质特性针对性优化。

2.3 核心影响因素权重测算与优先级排序

采用层次分析法与专家打分法结合的方式进行权重测算，构建目标层（模具寿命）、准则层（设计、材料、工艺、维护）、指标层（各核心影响因素）的层级模型。邀请模具设计、制造、现场运维领域专家，基于铁塔构件加工场景打分，通过一致性检验确保结果可靠性。权重测算结果显示，工艺类因素权重最高（35%），其中热处理工艺（18%）、冲孔参数适配性（17%）为核心指标；材料类因素权重次之（28%），模具基材性能（15%）、表面处理工艺（13%）占比突出；设计类因素权重22%，冲裁间隙匹配度（12%）为关键；使用维护类因素权重15%。优先级排序为：热处理工艺 > 冲孔参数适配性 > 模具基材性能 > 冲裁间隙匹配度 > 表面处理工艺 > 冷却润滑维护。

2.4 影响因素交互作用分析

各核心影响因素并非孤立作用，而是存在显著交互效应，共同影响模具寿命。设计与工艺因素交互明显，合理的冲裁间隙设计需搭配精准的制造工艺，若间隙设计优化但制造精度不足，仍会导致应力集中加剧；材料与工艺因素存在协同关系，优质模具基材需适配科学的

热处理工艺，否则无法充分发挥材料性能，甚至出现性能衰减。冷却润滑维护与工艺、材料因素交互显著，适配的冷却润滑方案可缓解冲裁参数不合理带来的磨损，同时减少劣质材料的腐蚀风险。设计与材料因素存在互补性，刃口结构优化可弥补部分基材韧性不足的缺陷，而优质材料能提升设计方案的实施效果。交互作用易形成叠加效应，正向交互可强化寿命延长效果，反向交互则会加速模具失效^[2]。

3 铁塔构件冲孔加工模具寿命延长方案构建

3.1 方案构建的核心原则与目标

方案构建遵循实用性、经济性、系统性、可持续性四大核心原则。实用性要求措施适配铁塔构件加工现场工况，易落地、易操作；经济性需平衡投入与收益，在提升模具寿命的同时控制材料、工艺、维护成本；系统性确保方案覆盖设计、材料、制造、使用全环节，形成闭环优化；可持续性要求措施兼顾设备损耗与环境影响，减少废弃物产生。核心目标分为三个层级：短期目标将模具平均使用寿命提升30%以上，降低换模频率与停机损失；中期目标优化模具全生命周期成本，使单位构件模具损耗成本下降25%；长期目标建立标准化的模具寿命管控体系，实现模具失效可预测、维护可规范，保障铁塔构件冲孔加工效率与精度稳定，提升生产连续性。

3.2 基于设计优化的寿命延长措施

设计优化聚焦应力分散与结构适配，提升模具抗失效能力。刃口结构优化采用圆弧过渡设计，替代传统直角刃口，减少应力集中，同时根据铁塔构件钢材特性，调整刃口角度至15°-20°，降低冲裁阻力与磨损。冲裁间隙采用自适应设计，针对不同厚度、强度的铁塔构件，预设可调节间隙结构，确保间隙始终处于最优范围（材料厚度的5%-8%）。导向机构优化选用高精度滚珠导柱导套，提升导向精度，避免冲压过程中模具偏载，同时增加导向面润滑槽，减少摩擦损耗。在模具易失效部位（如冲头根部）增加强化筋结构，提升局部刚度；优化模具排气孔设计，避免冲压过程中空气滞留导致的载荷波动，进一步延长模具寿命。

3.3 基于材料改进的寿命延长措施

材料改进从基材升级与表面强化两方面入手，提升模具抗磨损、抗疲劳性能。基材选用高性能合金工具钢（如Cr12MoV改性钢），通过精准控制碳、铬、钼元素含量，平衡硬度与韧性，材料纯净度控制在99.9%以上，减少内部夹杂缺陷。表面强化采用复合处理工艺，先进行离子氮化处理，提升模具表面硬度与耐磨性，氮化层厚度控制在0.15-0.2mm；再进行TiN涂层处理，增强表面

润滑性与抗腐蚀性,提升涂层附着力。针对冲头、凹模等关键部件,采用局部镶嵌硬质合金的方式,强化易磨损部位性能。同时,优化材料热处理后的组织均匀性,通过双重回火工艺消除内应力,提升材料抗疲劳能力,减少裂纹萌生风险。

3.4 基于制造工艺优化的寿命延长措施

制造工艺优化聚焦精度提升与缺陷管控,确保设计方案落地。模具加工采用高精度数控磨削设备,将刃口表面粗糙度控制在 $Ra0.2\mu m$ 以下,减少工作时的摩擦阻力与应力集中。热处理工艺优化采用分级淬火+等温回火工艺,淬火温度精准控制在 $850-880^{\circ}C$,冷却速度梯度调节,避免模具变形;回火分两次进行,温度分别为 $200^{\circ}C$ 、 $400^{\circ}C$,充分消除内应力,获得均匀的马氏体组织。装配工艺优化采用分组装配法,对导柱导套、冲头凹模等部件进行精度配对,确保装配间隙均匀,同时加强装配后的调试,检测模具同轴度、平行度,误差控制在 $0.01mm$ 以内。另外,增加制造过程中的无损检测环节,采用超声波探伤排查内部裂纹,避免带缺陷模具投入使用^[3]。

3.5 基于冲孔加工工艺适配的寿命延长措施

加工工艺适配以减少模具负荷为核心,实现精准调控。根据铁塔构件材质与厚度,建立冲压参数数据库,优化冲裁速度、冲压力度,对于高强度钢材,采用低速冲裁($50-80$ 次/分钟),避免冲击载荷过大;同时采用分段冲裁工艺,降低单次冲裁负荷。冲裁前增加构件预处理环节,通过抛丸处理去除表面氧化皮、杂质,减少磨粒磨损;对构件表面进行润滑处理,选用专用极压切削液,提升润滑效果。优化送料机构精度,采用伺服送料系统,将送料偏差控制在 $\pm 0.02mm$,避免偏载冲击。建立工艺参数动态调整机制,根据模具磨损状态(通过精度检测判断),适时微调冲裁间隙与压力,延缓磨损进程。

3.6 基于使用与维护强化的寿命延长措施

使用与维护强化建立全流程管控机制,减缓模具失效速度。制定标准化操作规程,明确操作人员岗位职责,禁止超负荷、违规冲压作业,定期开展技能培训,提升操作规范性。冷却润滑系统强化采用自动循环润滑装置,实时监测润滑液浓度与温度,定期更换(每150小时更换一次),避免劣质润滑液腐蚀模具。建立定期检

修制度,每日班前检查模具刃口磨损、表面锈蚀情况,每周进行全面拆解检修,打磨钝化刃口,清理间隙杂质;每月进行精度校准,及时更换磨损部件。模具存储采用干燥、防潮仓库,存储前涂抹防锈油,避免氧化锈蚀,同时分类存放,防止磕碰损伤。

3.7 寿命延长方案的整合与优化

方案整合以核心影响因素优先级为导向,构建“设计-材料-工艺-维护”全链条协同体系,避免单一措施效果局限。将热处理工艺优化、冲裁参数适配作为核心抓手,搭配基材升级与刃口设计优化,形成核心强化模块;以冷却润滑维护、定期检修为辅助,保障核心措施落地效果。优化过程中,建立方案实施效果评价机制,通过跟踪模具使用寿命、失效模式、成本投入等数据,对比分析各措施实施效果。针对交互作用较强的因素(如材料与热处理),细化协同参数,提升叠加效应;剔除低效、高成本措施,替换为适配性更强的方案。最终形成标准化、可复制的模具寿命延长体系,同时预留优化空间,结合新型材料、工艺技术发展,持续迭代方案,实现模具寿命稳步提升。

结束语

本文通过对铁塔构件冲孔模具失效的深入分析,精准识别核心影响因素并构建寿命延长方案。经整合优化形成全链条协同体系,从多维度提升模具寿命,降低单位构件模具损耗成本。未来,随着新型材料与工艺技术发展,需持续迭代方案,不断完善模具寿命管控体系,以适应铁塔构件加工行业不断变化的需求,推动行业高效、稳定发展。

参考文献

- [1]李文杰,刘超,王青云,等. 高压输电线路铁塔攀爬机器人夹持机构设计[J]. 机械设计与制造,2025,409(3):257-261.
- [2]吕庆,胡嘉飞,麻坚,等. 输电铁塔装配式基础抗剪键连接的剪切性能[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1153-1160.
- [3]刘骁繁,林禹轩,刘志伟,等. 在建输电铁塔-悬浮抱杆耦合体系动力特性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2025,42(1):121-130.