

输电线路金具淬火热处理工艺改良探究

苏黎明

中国电建集团河南电力器材有限公司 河南 漯河 462000

摘要：为解决输电线路金具传统调质热处理性能不均、稳定性差、能耗偏高的问题，本文以35CrMo钢材质的球头挂环为研究对象，系统分析传统工艺的生产缺陷及成因，从工艺参数、冷却系统、预处理及质控体系开展全方位改良。采用差异化控温、梯度升温与复合智能冷却方式优化生产流程。试验结果表明，改良工艺可细化金相组织，提升球头挂环综合力学性能与量产良品率，降低生产能耗，能够更好地适配户外复杂输电工况，具备较高工程推广价值。

关键词：输电线路；球头挂环；调质热处理；工艺改良

引言：输电线路金具是电网安全稳定运行的关键配件，球头挂环作为悬垂串、耐张串核心连接件，长期服役于复杂户外环境，承受交变拉伸与弯曲载荷，力学性能及结构稳定性要求严苛。35CrMo钢球头挂环传统调质热处理工艺参数固化、冷却形式单一，存在残余应力偏大、成品一致性差等缺陷，易诱发构件变形、开裂故障，且工艺能耗高、生产效率低下。针对上述工程痛点，本文优化改良该钢材球头挂环传统调质工艺，并开展试验验证，为线路金具热处理提质降耗提供技术支撑。

1 35CrMo 钢球头挂环传统调质热处理工艺及缺陷分析

1.1 35CrMo材质特性及球头挂环性能要求

(1) 材质特性：球头挂环主体采用35CrMo合金结构钢，该材料具有较高的淬透性和良好的综合力学性能，含碳量0.32%~0.40%，并添加Cr、Mo等合金元素，可有效细化晶粒、提高回火稳定性。但其对热处理温度较为敏感，参数控制不当易出现组织粗大或过烧现象。(2) 工况性能要求：球头挂环服役于输电线路连接节点，须承受长期交变拉伸、弯曲及冲击载荷，性能要求严苛。须具备均衡的硬度与韧性以抵御疲劳断裂，拥有良好耐磨性和抗变形能力，保障长期结构稳定，同时具备一定的耐腐蚀性能，适配雨雪、酸碱大气等户外腐蚀环境。

1.2 传统调质热处理工艺流程

(1) 预处理工序：调质前需完成锻造成型、表面打磨、除垢清理作业，去除球头挂环表面氧化皮、毛刺与杂质，保证工件表面洁净度，规避杂质影响淬火效果，为后续热处理提供合格工件基础。(2) 核心调质工序：传统工艺采用电炉升温，依据35CrMo材质设定固定保温温度与时长，保障工件内部充分奥氏体化；多采用水、油单一介质自然冷却，按固定流程完成淬火硬化，随后

进行高温回火，无精准速率调控。(3) 后续回火处理：淬火后开展高温回火，通过固定温度与保温时间，获得回火索氏体组织，释放淬火残余应力，微调球头挂环硬度与韧性，优化工件综合力学性能^[1]。

1.3 传统工艺生产应用中的主要缺陷

(1) 力学性能缺陷：调质后球头挂环普遍存在硬度分布不均问题，残余应力堆积严重，整体韧性不足，长期运行易出现变形、开裂、断裂等故障，降低输电运行安全性。(2) 工艺稳定性缺陷：依赖人工控温、自然冷却，人为误差与环境影响较大，同批次产品性能差异显著，工艺重复性差，导致产品良品率偏低。(3) 经济性缺陷：传统升温、冷却方式能耗损耗高，冷却介质消耗量大，且生产流程自动化程度低、工序耗时长，生产效率低下，量产综合成本较高。

1.4 工艺缺陷成因深度剖析

(1) 参数匹配不合理：固定化热处理参数无法适配35CrMo钢材质的相变规律，淬火温度、保温时间与工件适配度不足，造成金相组织转变异常。(2) 冷却体系不完善：仅采用单一冷却介质，冷却速率无法精准调控，工件内外冷却速度差异大，导致金相组织转变不充分、不均匀，诱发性能缺陷。(3) 工艺管控精细化不足：全程缺乏智能化监测设备，升温、保温、冷却各阶段温度把控精度低，无法实时修正工艺偏差，缺陷持续产生。

2 35CrMo 钢球头挂环调质热处理工艺改良方案设计

2.1 工艺改良总体思路与设计原则

(1) 改良总体思路：针对传统球头挂环调质工艺存在的金相组织不均、残余应力偏大、批次性能离散度高、能耗偏高等突出缺陷，本文从关键参数优化、冷却体系升级、智能工艺管控三个核心维度开展系统性改良。摒弃传统经验式、固定参数式的粗放加工模式，通

过数字化仿真、差异化控温、智能化冷却调控手段,优化热处理全流程,构建一套高精度、低缺陷、高稳定性的新型调质工艺体系,从根本上提升球头挂环力学性能与服役稳定性^[2]。(2)改良设计原则:本次工艺改良严格遵循四项核心原则。一是性能优先原则,以改善球头挂环硬度、韧性、抗疲劳变形性能为核心,满足高压输电线路长期复杂工况需求;二是稳定量产原则,统一工艺标准,将批次性能误差控制在5%以内,提升产品一致性;三是节能降耗原则,优化升温、保温、冷却工序,降低无效能耗与介质损耗;四是工程适配原则,改良工艺兼容现有生产设备,兼顾工艺可行性、安全性与生产经济性,便于规模化推广应用。

2.2 关键工艺参数优化设计

(1)淬火温度优化:基于35CrMo钢材质的相变特性,借助有限元仿真模拟精准标定其奥氏体化温度区间。将传统固定850℃淬火模式优化为精准控温体系,最优淬火温度设定840–870℃,彻底规避温度过低导致的欠烧、相变不充分,以及温度过高超过880℃引发的晶粒粗大、过烧开裂问题,保障淬火基础质量。(2)保温时间优化:打破传统统一30min保温的粗放工艺,依据球头挂环壁厚精准匹配保温时长。设定壁厚 $\leq 10\text{mm}$ 工件保温15–20min,10–20mm工件保温25–35min,确保工件表层与芯部温度同步、相变充分,实现金相组织均匀转变,有效解决厚薄壁工件内外性能差异过大的问题^[3]。(3)升温速率优化:取消传统单一5℃/min匀速升温工艺,采用三段式梯度升温方案。室温至400℃以8℃/min快速升温,提升生产效率;400–700℃降至4℃/min慢速升温;700℃至淬火恒温区间以2℃/min平稳升温,有效缩小工件内外温差,可降低30%以上的初始热残余应力,减少后续变形、开裂隐患。(4)回火温度优化:匹配改良淬火工艺,将回火温度精确控制在550–650℃之间,保温时间40–60min,获得均匀细密的回火索氏体组织,在保证足够硬度的前提下最大化提升韧性。

2.3 冷却系统工艺改良设计

(1)复合冷却介质配比优化:摒弃传统单一水冷、油冷模式,配比油水复合型冷却介质,以90%基础冷却水+8%淬火油+2%功能添加剂调配而成。该介质可实现梯度冷却,高温阶段冷却速率接近水冷,保证淬火硬度,低温阶段冷却速率放缓,规避急速降温产生的微裂纹,有效平衡球头挂环淬火硬度与断裂韧性。(2)分区冷却工艺设计:根据球头挂环受力特征,划分球头端、挂环端及杆部区域。对球头端和挂环端等承载核心区域,提升15%冷却强度,强化硬度与耐磨性;对杆部中段适度放缓

冷却速率,保留材料韧性,实现不同部位性能精准适配工况载荷需求。(3)冷却过程智能化管控:加装高精度红外测温模块与自动调速冷却系统,温度监测精度可达 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,实时采集工件表面与芯部温度数据。系统可根据温度变化自动调节介质流量与冷却速率,全程闭环智能调控,替代人工经验操作,实现冷却流程标准化、精准化^[4]。

2.4 配套辅助工艺改良设计

(1)预处理工艺优化:升级前期预处理流程,采用机械喷砂+酸洗联合除垢方式,彻底清除工件表面氧化皮与杂质,表面洁净度提升95%以上。新增200℃低温预热工序,保温10min,消除锻造、机加工产生的初始残余应力,为均匀淬火奠定基础。(2)回火工艺精准适配:匹配改良淬火工艺参数,采用高温回火制度,将回火温度稳定控制在550–650℃,保温时长统一调整为50min。精准的回火参数可有效释放淬火残余应力,细化回火索氏体组织,让球头挂环在保持高硬度的同时,韧性提升15%左右,综合力学性能更适配户外交变工况^[5]。(3)工艺质控流程优化:建立全流程质控体系,对升温速率、恒温温度、保温时长、冷却参数、回火参数进行全程数据记录存档。设置每批次3%比例抽检机制,检测硬度、金相组织、变形量等关键指标,及时修正工艺偏差,保障批量生产产品性能稳定一致。

3 改良工艺试验验证与效果分析

3.1 试验方案设计

(1)试验试样选取:本次试验选取电网工程应用频率最高的35CrMo钢球头挂环为试样,包含常规16mm、20mm两种杆径规格,覆盖常规工况受力类型。所有试样均为同一批次锻造毛坯,初始加工精度、表面状态统一,有效规避毛坯差异对试验结果的干扰,保障样本工程代表性与试验可靠性。(2)试验设备与检测仪器:试验采用智能程控淬火炉,温控精度 $\pm 1^\circ\text{C}$;配备红外实时温度监测仪,采样频率10次/s;力学检测采用万能材料试验机与冲击韧性测试仪,精度等级0.5级。金相组织通过金相显微镜观测,可实现500倍高清组织成像,所有设备均校准合格,符合金属热处理检测国家标准。(3)试验对照组设置:试验设置双组对照体系,对照组采用传统匀速升温、单一水冷工艺及常规回火,试验组采用参数优化与复合冷却改良工艺。严格遵循单一变量原则,两组试样材质、规格、试验环境完全一致,每组设置30个平行试样,通过多样本数据平均值降低试验误差,确保试验数据真实有效。

3.2 球头挂环金相组织对比分析

(1) 传统工艺金相组织特征: 经传统调质工艺处理后, 球头挂环金相组织存在明显不均匀问题, 晶粒尺寸跨度较大, 平均晶粒等级为6-7级, 回火索氏体分布不均, 局部存在粗大马氏体残留组织。同时工件表层与芯部组织相变程度不一致, 存在少量微孔隙、组织偏析缺陷, 是导致球头挂环残余应力大、易开裂的核心组织诱因。(2) 改良工艺金相组织特征: 改良工艺处理后的球头挂环金相组织细化效果显著, 晶粒尺寸均匀规整, 平均晶粒等级提升至8-9级, 回火索氏体组织分布致密均匀。工件表层与芯部相变同步性大幅提升, 无明显微缺陷与组织偏析问题, 金相组织整体致密性、稳定性显著优于传统工艺试样。(3) 组织改良机理分析: 分段升温工艺有效减缓了工件热冲击, 让金属内部原子充分扩散, 保障相变过程稳定进行。复合可控冷却模式可精准匹配35CrMo材质相变速率, 抑制粗大晶粒生成, 促进细密均匀回火索氏体形成, 从微观层面优化球头挂环内部结构, 彻底改善传统工艺的组织缺陷。

3.3 力学性能试验结果分析

(1) 硬度性能对比: 试验检测结果显示, 传统工艺试样硬度偏差可达HRC4-6, 球头端与挂环端硬度偏低; 改良工艺试样整体硬度偏差控制在HRC1-2, 硬度均匀性提升约70%, 且球头端、挂环端硬度达标率100%, 彻底解决硬度分布不均的工程缺陷。(2) 韧性与抗疲劳性能对比: 冲击试验数据表明, 改良后球头挂环冲击韧性提升18%以上; 经过10万次交变拉伸载荷疲劳试验, 改良工艺试样无开裂、损伤问题, 疲劳寿命较传统试样提升25%, 有效增强球头挂环在复杂交变工况下的抗断裂能力。(3) 抗变形性能对比: 在-20℃~60℃高温交替工况试验中, 传统工艺试样最大变形量为0.12mm, 改良工艺试样变形量仅0.04mm, 抗变形性能提升67%, 工况适配性与结构稳定性大幅提升。

3.4 工艺经济性与工程适用性分析

(1) 生产效率与能耗分析: 数据显示, 改良工艺单

次调质处理生产周期缩短12%, 设备能耗降低15%, 同时复合冷却介质可循环利用率提升至90%, 大幅减少介质损耗, 有效降低单件球头挂环热处理生产成本, 节能增效优势显著。(2) 量产稳定性分析: 通过5批次量产重复性试验, 传统工艺产品良品率为82.3%, 改良工艺良品率提升至97.6%, 批次间性能误差控制在3%以内, 远低于传统工艺12%的批次误差, 量产稳定性与合格率大幅提升。

(3) 工程应用适配性: 改良工艺无需大幅改造现有生产设备, 工序适配性强, 可直接应用于球头挂环规模化生产。改良后球头挂环力学性能稳定、故障率低, 可有效降低电网运维检修成本, 适配户外复杂输电工况, 具备极高的工程推广价值与应用前景。

结束语

本文针对35CrMo钢球头挂环传统调质热处理的各种缺陷, 完成工艺参数、冷却系统、辅助工序及质量管控的整体改良。经试验证实, 改良工艺可有效细化回火索氏体组织, 提升球头挂环韧性与抗变形能力, 显著提高产品良品率, 降低生产能耗与运维成本。改良工艺适配现有生产设备, 可满足规模化生产需求, 对提升球头挂环服役可靠性、优化热处理生产工艺具有重要的工程实际意义。

参考文献

- [1]张锐.激光淬火技术提升输电线路金具耐磨性能的研究[J].中国激光,2026,53(8):260-265.
- [2]吴明辉.电力连接金具用钢材抗磨蚀表面热处理技术研究进展[J].电镀与精饰,2025,47(10):112-118.
- [3]邓静伟.铝合金挂板金具热处理过程的有限元分析与工艺优化[J].热加工工艺,2024,53(14):151-154.
- [4]张建成.输电线路钢制金具淬火工艺参数优化及力学性能调控[J].热加工工艺,2023,52(8):136-139.
- [5]刘鑫,赵峰.高强电力金具淬回火热处理工艺改良与组织性能研究[J].电力工程技术,2023,42(3):189-194.