

# 输电铁塔构件热镀锌层附着力提升工艺改进

陈天峰

浙江盛达铁塔有限公司 浙江 舟山 311232

**摘要:**为解决输电铁塔构件热镀锌层附着力不足问题,保障电网户外服役稳定性,本文先分析热镀锌工艺流程与附着力形成机理,阐述附着力缺陷的表现及危害。从表面预处理、镀锌工艺参数、基体材料、后处理工艺四方面,剖析影响附着力的关键因素。进而提出表面预处理优化、工艺参数调控、合金化改性、后处理改进及数值模拟预测等综合提升方案,配套给出技术支撑、标准完善、投入保障的落地对策。研究可为输电铁塔构件热镀锌工艺优化提供技术参考,有效提升镀锌层附着力与耐久性,降低运维成本,助力输电工程质量升级。

**关键词:** 输电铁塔构件; 热镀锌; 附着力; 工艺改进

引言:输电铁塔作为电网输送的核心基础设施,长期暴露于户外复杂环境,易受腐蚀侵蚀,热镀锌是其主流防腐手段。镀锌层附着力直接决定防腐效果与构件服役寿命,当前生产中普遍存在起皮、脱落等附着力缺陷,引发构件锈蚀、承载能力下降,甚至诱发安全事故。随着电网建设对装备可靠性要求提升,亟需破解镀锌层附着力难题。本文基于热镀锌技术原理,系统分析影响附着力的关键因素,构建科学可行的工艺改进方案与落地路径,为提升铁塔构件防腐性能、保障电网安全稳定运行提供支撑。

## 1 输电铁塔构件热镀锌层附着力问题分析

### 1.1 热镀锌工艺流程与附着力形成机理

输电铁塔构件热镀锌核心流程包括表面预处理、热浸镀、后处理三大环节,预处理去除油污、锈蚀后,构件浸入440-460°C熔融锌液,经浸润、反应、冷却形成镀锌层。附着力形成源于锌与基体铁的冶金结合,锌液与铁发生扩散反应,生成 $FeZn_7$ 、 $Fe_2Zn_{10}$ 等金属间化合物过渡层,过渡层与基体、外层锌层紧密衔接,构成稳固结合体系。过渡层厚度与结构均匀性直接决定附着力,过厚易产生脆性开裂,过薄则结合力不足。该机理依托金属间扩散与化学反应,使镀锌层兼具防腐性与结构稳定性,适配铁塔户外复杂工况<sup>[1]</sup>。但生产中过渡层形成受多重因素干扰,易引发附着力缺陷,影响铁塔构件服役寿命,需深入掌握机理以优化工艺。

### 1.2 附着力不足的典型表现与危害

热镀锌层附着力不足典型表现为起皮、脱落、鼓泡、划格试验掉渣等,轻微受力或环境侵蚀下,锌层易与基体分离,局部出现片状脱落或点状鼓包,严重时形成大面积裸露基体。此类缺陷对输电铁塔危害极大,户外环境中,脱落部位易受风雨、酸碱介质侵蚀,加速基体锈

蚀,降低构件承载能力。极端天气下,锈蚀构件可能发生断裂,引发铁塔倾斜、倒塌等安全事故,影响电网稳定运行。同时,附着力不足会缩短镀锌层使用寿命,增加维修更换成本,频繁检修还可能中断供电,造成经济损失与社会影响。另外,缺陷镀锌层无法满足行业防腐标准,可能导致构件报废,浪费原材料与生产资源,制约输电工程质量提升。

## 2 影响附着力的关键因素

### 2.1 表面预处理

表面预处理是保障镀锌层附着力的前提,核心包括除油、酸洗、漂洗、助镀四大步骤,任一环节存在缺陷均会影响结合效果。除油不彻底会导致锌液与基体局部不浸润,形成虚镀、漏镀;酸洗过度会腐蚀基体表面,生成过厚氧化层,阻碍金属间反应,酸洗不足则残留锈蚀,破坏结合界面。漂洗需去除酸洗残留酸液,否则残留酸会在镀锌时引发化学反应,产生杂质影响过渡层形成。助镀剂可改善锌液润湿性,但若浓度不当、附着不均,会导致锌层结合力下降。预处理后的基体表面粗糙度需控制在合理范围,过粗易藏污纳垢,过细则锌液吸附力不足,均会降低镀锌层附着力,成为生产中首要控制因素。

### 2.2 镀锌工艺参数

镀锌工艺参数是影响附着力的核心变量,主要包括锌液温度、浸镀时间、提镀速度与锌液成分。锌液温度控制在440-460°C,过高会加速基体铁溶解,生成过厚脆性过渡层,过低则锌液流动性差,润湿性不足,导致结合不紧密。浸镀时间需适配构件尺寸,过长使过渡层过厚易开裂,过短则反应不充分,结合力不足。提镀速度过快会产生锌液流挂、镀层不均,过慢则增加锌层厚度与脆性。锌液中铝、铅等杂质含量需严格控制,铝可细

化晶粒提升附着力,但过量会降低锌液流动性;铅易导致锌层软脆,影响结合效果。参数协同匹配度直接决定过渡层结构,是保障附着力的关键工艺环节。

### 2.3 基体材料

基体材料的成分、组织与表面状态对镀锌层附着力影响显著。输电铁塔构件多采用Q235、Q355等低碳钢,碳含量过高会在镀锌时形成碳化铁,阻碍锌铁扩散反应,降低结合力,同时增加过渡层脆性<sup>[2]</sup>。材料中硫、磷等杂质会形成低熔点化合物,在锌液高温下产生微裂纹,破坏结合界面。基体金属组织均匀性至关重要,晶粒粗大或存在偏析、夹杂等缺陷,会导致表面反应不均,过渡层厚度差异大,引发附着力波动。此外,基体表面加工痕迹、划痕等缺陷会成为应力集中点,镀锌后易在缺陷处出现锌层脱落,需控制加工精度,避免表面损伤。基体材料的先天特性的差异,需通过后续工艺适配优化,才能保障镀锌层附着力达标。

### 2.4 后处理工艺

后处理工艺通过细化锌层结构、消除内应力,间接提升镀锌层附着力,主要包括冷却、钝化、封闭等步骤。冷却方式与速度影响锌层结晶质量,水冷速度过快会产生热应力,导致锌层与基体间出现剥离倾向,空冷速度过慢则锌层晶粒粗大,降低结合紧密性。钝化处理通过形成钝化膜增强防腐性,但若钝化液浓度不当、处理时间不足,会导致膜层附着不均,引发局部腐蚀,间接破坏附着力。封闭处理可填充锌层孔隙,但若封闭剂与锌层结合不良,易产生鼓泡,影响整体结合效果。后处理过程中若出现操作不当,如冷却水质差、钝化液残留,会加速锌层老化脱落,需严格控制各环节参数,确保后处理与前序工艺衔接,强化镀锌层整体稳定性。

## 3 热镀锌层附着力提升工艺改进方案

### 3.1 表面预处理优化

表面预处理优化需构建全流程精细化控制体系,除油采用碱性除油剂与超声波协同处理,提升油污去除效率,针对复杂构件边角、焊缝等部位,延长超声处理时间,确保无残留。酸洗环节采用分级酸洗工艺,先低浓度盐酸初步除锈,再用稀酸精洗,控制酸洗温度与时间,避免基体过腐蚀,同时加入缓蚀剂,减少表面损伤。漂洗采用多级逆流漂洗,最后一级使用去离子水,控制水质pH值与杂质含量,杜绝酸液残留。助镀剂选用环保型氯化铵-氯化锌复合体系,优化浓度配比,采用喷淋方式均匀附着,助镀后快速烘干,避免表面返潮。同时引入表面粗糙度检测,控制Ra值在合适范围,通过预处理工艺优化,构建洁净、均匀的结合界面,为提升附着力奠

定基础。

### 3.2 镀锌工艺参数优化

基于构件尺寸与基体材质,建立参数动态优化模型,锌液温度采用智能温控系统,精准控制在445-455℃,实时监测并补偿温度波动。浸镀时间根据构件厚度调整,薄件控制在3-5分钟,厚件延长至5-8分钟,同时采用分段浸镀方式,减少局部反应不均。提镀速度优化为匀速提升,结合构件形状调整速度梯度,复杂构件采用低速匀速提镀,避免锌层流挂与应力集中。锌液成分通过在线检测系统实时监控,精准添加铝元素,控制含量在0.02-0.05%,去除铅、锡等有害杂质,定期净化锌液。此外,在锌液中加入微量稀土元素,细化过渡层晶粒,提升结合强度,通过多参数协同优化,构建适配不同构件的工艺体系,保障附着力稳定达标。

### 3.3 合金化改性技术

合金化改性技术作为提升镀锌层性能的关键手段,通过精准优化镀锌层与过渡层的成分构成,显著增强其附着力与综合性能,主要涵盖锌基合金镀层与过渡层改性两大方向。在锌基合金镀层方面,选用锌-铝-镁合金体系,科学调配三种元素比例。其中,铝元素的加入能有效提升镀层硬度与附着力,镁元素则大幅增强防腐性能。通过精细调整合金成分,让镀层兼具良好韧性与稳定性,完美适配户外复杂多变的工况环境。过渡层改性采用扩散合金化工艺,在完成镀锌操作后,进行低温加热处理,促使锌铁原子均匀扩散,细化过渡层晶粒,消除脆性相,降低内应力。还可运用等离子喷涂预处理技术,在基体表面预先形成合金过渡层,大幅提升锌液润湿性与结合力。值得注意的是,合金化改性技术对温度、时间等参数要求极为严格,需精准把控,避免生成有害相,通过成分与结构的双重优化,显著提升镀锌层与基体的冶金结合强度,有效延长其服役寿命<sup>[3]</sup>。

### 3.4 后处理工艺改进

后处理工艺改进聚焦应力消除与界面强化,冷却环节采用分段冷却工艺,先空冷至300℃左右,再进行温水冷却,梯度降低温度,减少热应力与冷缩差异,避免锌层剥离。钝化处理选用无铬钝化剂,优化钝化工艺参数,控制钝化液浓度、温度与处理时间,形成均匀致密的钝化膜,提升膜层与锌层的结合力,同时兼顾环保要求。封闭处理采用纳米封闭剂,通过浸泡方式填充锌层孔隙,封闭剂中添加粘结剂,增强与钝化膜的结合效果,避免鼓泡脱落。另外,增加后处理检测环节,通过附着力测试、膜层厚度检测,筛选不合格产品并返工,形成“镀锌-后处理-检测”闭环,确保后处理工艺有效提升镀锌层附着

力与稳定性。

### 3.5 数值模拟与工艺预测

引入数值模拟技术,构建热镀锌过程多物理场耦合模型,模拟锌液流动、热量传递与锌铁扩散反应过程,预测过渡层厚度、结构与附着力分布。基于有限元分析方法,优化构件浸镀姿态、提镀速度等参数,规避局部应力集中与反应不均问题。通过模拟不同工艺参数组合下的附着力变化规律,建立工艺预测模型,实现参数的精准调控与优化,减少试错成本。同时结合机器学习算法,收集生产过程中的工艺参数、检测数据,训练预测模型,提升对附着力缺陷的预判能力,提前调整工艺参数。数值模拟与工艺预测技术的应用,实现热镀锌工艺从经验控制向精准化、智能化转变,为附着力提升提供技术支撑。

## 4 推动工艺改进方案落地的对策建议

### 4.1 强化技术支撑,推动方案落地实施

强化技术支撑需构建“产学研用”协同创新体系,推动科研机构、高校与生产企业深度合作,针对改进方案中的关键技术难题开展联合攻关,加快技术成果转化。组建专业技术团队,负责方案的落地指导、工艺调试与人员培训,确保一线操作人员熟练掌握优化后的工艺参数与操作规范。建立技术服务机制,定期深入生产现场,排查工艺执行中的问题,提供个性化解决方案。同时引入第三方检测机构,搭建附着力专项检测平台,对产品进行常态化检测,保障工艺改进效果。加强行业技术交流,推广先进经验与技术成果,促进企业间技术共享,打破技术壁垒,为方案落地提供全方位技术保障,推动改进工艺规模化应用。

### 4.2 完善标准体系,规范热镀锌生产管理

结合工艺改进方案,修订完善输电铁塔构件热镀锌行业标准,细化表面预处理、镀锌参数、后处理等环节的技术要求,明确附着力检测方法、合格标准与判定规则,填补现有标准空白。建立全流程生产管理制度,规范原材料采购、工艺执行、产品检测、仓储运输各环节流程,落实岗位责任制,确保每道工序有据可依、有迹可查。加强标准宣贯与执行监督,组织企业开展标准培训,提升全员标准意识,行业主管部门定期开展专项检查,严厉查处违规生产行为。推动企业建立质量管理

体系,通过ISO9001认证,将工艺改进要求融入质量管理全过程,实现生产管理规范化、标准化,保障镀锌层附着力稳定达标。

### 4.3 加大投入力度,提升企业技术创新能力

企业需加大资金投入,购置智能温控设备、在线检测系统、数值模拟软件等先进装备,升级生产流水线,为工艺改进提供硬件支撑。设立技术创新专项基金,用于关键技术研发、成果转化与人才培养,鼓励研发团队开展镀锌层附着力提升相关研究,对创新成果给予奖励<sup>[4]</sup>。加强人才队伍建设,引进材料、冶金等领域专业人才,同时培养内部技术骨干,通过校企合作、在职培训等方式,提升团队专业素养与创新能力。政府可出台扶持政策,对企业技术改造、研发投入给予补贴与税收优惠,引导金融机构提供信贷支持,缓解企业资金压力。通过多方投入,构建“装备升级-研发创新-人才支撑”的良性循环,提升企业核心竞争力,推动工艺改进方案长效落地。

## 结束语

输电铁塔构件热镀锌层附着力提升是关乎电网安全运维的重要技术课题,需兼顾工艺优化与落地执行。本文提出的多维度改进方案的核心在于通过全流程精细化控制与技术创新,强化锌层与基体的冶金结合。方案落地需依托产学研协同、标准规范与资源投入形成合力,才能切实解决实际生产中的附着力缺陷。未来可进一步深化合金化改性 with 智能模拟技术应用,推动热镀锌工艺向精准化、绿色化升级,持续提升铁塔构件防腐可靠性,为电网工程高质量发展筑牢技术根基。

## 参考文献

- [1]刘昌帅,董泽才,王若民,等.工业污染区输电铁塔构件的大气腐蚀与防护[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(7):906-911.
- [2]姜岚,王茜雯,唐波,等.考虑多评价指标的输电铁塔结构重要构件判别方法[J].国外电子测量技术,2023,42(12):49-56.
- [3]丁勇,王维.输电铁塔均匀锈蚀角钢构件蚀余承载力评估[J].中国新技术新产品,2024(20):68-70.
- [4]张亮,唐亚可,田利,等.输电铁塔角钢无损加固分析与计算方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):94-102.