

热镀锌钢丝热处理工艺对其微观结构与性能的影响研究

李加革¹ 于茂来² 官明江³

1. 天津华源线材制品有限公司 天津 301600
2. 天津福桥金属制品有限公司 天津 301600
3. 天津华源线材制品有限公司 天津 301600

摘要: 本文聚焦热镀锌钢丝热处理工艺对其微观结构与性能的影响。先阐述制备与热处理工艺设计要点,接着通过光学显微镜、扫描电镜、X射线衍射分析热处理对微观结构的作用,再从力学、耐腐蚀及其他性能测试说明对性能的影响。最后基于微观结构与性能关联优化工艺,经验证与应用,实现综合性能提升,满足高端领域需求,增强产品市场竞争力。

关键词: 热镀锌钢丝; 热处理工艺; 微观结构; 性能

引言: 热镀锌钢丝凭借良好性能广泛应用于桥梁缆索等领域。其质量受制备与热处理工艺影响显著,合理的工艺能改善钢丝内部组织,提升综合性能。然而,热处理工艺参数复杂,不同参数下钢丝微观结构和性能差异较大。深入研究热处理工艺对热镀锌钢丝微观结构与性能的影响,对优化工艺、提高产品质量、拓展应用范围具有重要的理论和实践意义。

1 热镀锌钢丝的制备与热处理工艺设计

1.1 热镀锌钢丝的制备工艺

热镀锌钢丝的制备工艺是一个连续化的系统工程,主要包括原料预处理、拉拔成型、热浸镀锌三大核心工序,每一步均需严格控制参数以保障产品质量。原料预处理阶段,先对盘条进行酸洗除锈,去除表面氧化铁皮与油污,再采用磷化处理替代传统涂硼处理,形成的磷化膜可起到润滑作用,减少拉拔过程中模具的磨损与动力消耗,随后进行化学活化处理,提升钢丝表面活性。拉拔成型工序采用多道次连续拉拔,根据目标钢丝直径精准调控拉拔速度与变形量,避免出现断丝、表面划伤等缺陷^[1]。热浸镀锌工序中,将预处理后的钢丝送入管式加热炉进行退火还原,再浸入470-480℃的熔融锌液中,浸镀完成后采用纯度大于99.95%的氮气气刀刮涂,控制镀层厚度均匀,最后经冷却、钝化处理,形成致密的镀锌层,有效提升钢丝的耐腐蚀性能,整个制备过程需实现各工序的连续衔接,减少中间环节的锈蚀风险。

1.2 热处理工艺参数的选择与设计

通讯作者: 官明江,男,1978年02月出生,汉族,籍贯:天津,职位:技术中心主任职称:高级工程师,学历:本科,研究方向:金属材料及热处理。

热处理工艺参数的选择与设计需结合盘条成分、钢丝规格及性能目标,核心是通过精准调控温度、保温时间、冷却速度等参数,优化钢丝内部微观组织,消除加工内应力。首先根据盘条的碳含量与网状渗碳体、马氏体等级确定奥氏体化加热温度,若碳含量为0.95-1.00%,通常选取930-950℃,碳含量高于1.00%则适当提高至940-970℃。退火还原工序采用管式加热炉连续进行,温度控制在720-760℃,还原气体露点低于-40℃,保温时间根据钢丝直径调整,直径越大保温时间越长,确保内部组织充分转变。冷却速度需精准把控,过快易产生马氏体等异常组织,过慢则导致晶粒粗大,通常采用分段冷却方式,兼顾组织细化与内应力消除。另外,需根据钢丝直径调整走线速度,11-12.5mm直径钢丝走线速度控制在3.1-3.8m/min,直径越大走线速度越慢,确保热处理效果均匀,为后续镀锌及性能提升提供保障。

2 热处理工艺对热镀锌钢丝微观结构的影响

2.1 光学显微镜分析

光学显微镜分析是观察热镀锌钢丝微观结构的基础手段,主要用于观察钢丝基体的晶粒形态、组织分布及镀锌层的厚度与结合状态,放大倍数通常控制在50-1000倍,可清晰呈现不同热处理参数下的组织变化。经适宜参数热处理后,钢丝基体主要呈现均匀细小的索氏体组织,索氏体片层间距均匀,无明显的马氏体、网状渗碳体等异常组织,镀锌层与基体结合紧密,厚度均匀,无明显缝隙与缺陷。若退火温度过低,显微镜下可见基体中残留大量块状渗碳体,晶粒粗大且分布不均,镀锌层与基体结合界面存在间隙,易出现镀层脱落隐患;若温度过高,晶粒出现明显长大现象,索氏体片层间距增大,镀锌层厚度不均,局部出现结瘤。

2.2 扫描电子显微镜分析

扫描电子显微镜分析可实现热镀锌钢丝微观结构的高倍观察,放大倍数可达数万倍,主要用于观察镀锌层的表面形貌、截面结构、元素分布及基体与镀层的结合界面细节,相较于光学显微镜,能更清晰呈现微观缺陷与组织特征^[2]。经优化热处理后,扫描电子显微镜下可见镀锌层表面平整致密,无明显孔隙、裂纹及结瘤缺陷,截面呈现清晰的分层结构,从内到外依次为基体、合金层与纯锌层,合金层(δ 相、 ζ 相)厚度均匀,与基体及纯锌层结合紧密,无间隙。若热处理参数不当,会出现镀锌层表面粗糙、孔隙增多,合金层过度生长或发育不全,结合界面出现剥离缝隙等问题,还可观察到原料丝表面残留的含硅氧化物导致的局部镀层异常增厚现象。通过能谱分析配合观察,可进一步明确微观区域的元素组成,为分析缺陷成因、优化热处理工艺提供精准的微观数据支撑。

2.3 X射线衍射分析

X射线衍射分析主要用于测定热镀锌钢丝的物相组成、晶体结构及晶格常数,明确热处理工艺对物相转变的影响,进而揭示微观结构与性能的内在关联。经适宜热处理后,X射线衍射图谱中可出现清晰的索氏体特征衍射峰,峰形尖锐且强度较高,表明索氏体组织含量高、结晶度好,镀锌层中主要出现纯锌(η 相)及铁锌合金相(δ 相、 ζ 相)的特征衍射峰,无明显杂质相衍射峰,说明物相组成均匀,无异常氧化相产生。若热处理温度过高,衍射图谱中索氏体特征峰强度减弱,出现晶粒长大导致的峰宽化现象,镀锌层中合金相衍射峰强度异常升高,表明合金层过度生长;若温度过低,会出现未转变的珠光体、渗碳体特征衍射峰,说明组织转变不充分。通过分析衍射峰的位置、强度与半高宽,可量化物相含量与晶粒尺寸,为热处理工艺的精准优化提供科学的物相分析依据。

3 热处理工艺对热镀锌钢丝性能的影响

热处理工艺通过调控热镀锌钢丝的微观结构,直接决定其宏观性能,包括力学性能、耐腐蚀性能及其他相关性能,合理的热处理工艺可实现各性能的协同提升,满足不同应用场景的需求。热处理参数的微小变化,都会导致微观结构的改变,进而引发性能波动:退火温度过低,钢丝内应力未充分释放,组织不均匀,会导致强度不足、塑性变差,镀锌层结合不牢固,耐腐蚀性能下降;温度过高,晶粒粗大,会导致钢丝韧性降低、易断裂,镀锌层易出现氧化、脱落等缺陷。通过系统的性能测试,可明确热处理工艺与各项性能的关联规律,确定最优参数范围,既保证钢丝具备足够的强度与韧性,又能提升镀锌层的防护性能,同时兼顾其他使用性能,为

后续工艺优化提供可靠的性能数据支撑。

3.1 力学性能测试

力学性能测试是全面且精准评价热镀锌钢丝质量的关键核心指标体系。它涵盖多个重要方面,像抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度以及扭转性能等。每一项测试都有着严格且细致的测试方法,这些方法严格遵循相关标准规范执行,从测试设备的选用、测试样品的制备,到测试过程中的操作步骤和条件控制,都做到精准无误,以此确保所获取数据的准确性与可比性,为后续的质量评估和工艺优化提供可靠依据。经优化热处理后,热镀锌钢丝的力学性能达到理想状态。抗拉强度可达到2100MPa以上,展现出强大的承载能力;屈服强度与抗拉强度匹配合理,保证钢丝在不同受力阶段都能稳定工作;伸长率不低于35%,赋予钢丝良好的塑性变形能力;显微硬度控制在430-470HV,硬度适中;扭转次数不低于20圈,具备出色的扭转性能,完全满足高强度应用需求。若热处理温度过低,钢丝内应力残留,组织转变不充分,会导致抗拉强度不足、伸长率偏低,硬度不均,扭转时易断裂;温度过高,晶粒粗大,韧性下降,虽抗拉强度可能提升,但伸长率显著降低,扭转性能恶化。通过力学性能测试,能量化热处理参数对性能的影响,明确参数调整方向,实现钢丝强度、塑性与韧性的平衡,适配桥梁缆索等高强度应用场景。

3.2 耐腐蚀性能测试

耐腐蚀性能是热镀锌钢丝的核心防护性能,对于保障钢丝在复杂环境下的长期稳定使用起着至关重要的作用。主要通过盐雾试验、硫酸铜浸蚀试验等科学有效的方法进行测试,以此全面评价镀锌层的防护效果与耐久性。在测试过程中,对试验环境与时间进行严格控制,从试验箱内的温度、湿度、盐雾浓度,到试验的持续时间,都按照标准精准设定和监控,确保测试结果可靠,能真实反映热镀锌钢丝的耐腐蚀能力^[3]。经适宜热处理后,镀锌层与基体结合紧密,表面致密无缺陷,如同给钢丝穿上了一层坚固的“防护衣”。在盐雾试验中可保持较长时间不出现锈蚀,硫酸铜浸蚀试验中符合相关标准要求,展现出优良的耐腐蚀性能。若热处理参数不当,会导致镀锌层与基体结合不牢固,表面出现孔隙、裂纹等缺陷,如同防护衣出现破洞。盐雾试验中易出现镀层脱落、基体锈蚀现象,硫酸铜浸蚀试验中反应速率异常,防护性能大幅下降。另外,热处理不当还会引发“圣德林效应”,导致镀锌层结瘤,进一步降低耐腐蚀性能。通过耐腐蚀性能测试,可明确热处理工艺对镀锌层防护效果的影响,为优化工艺、提升产品使用寿命提供有力的数据支撑。

3.3 其他性能测试

除力学性能与耐腐蚀性能外,热镀锌钢丝的其他性能测试还包括镀层附着力、疲劳性能、镦头性能等,这些性能同样受热处理工艺影响,直接关系产品的使用可靠性与适用范围。镀层附着力测试采用弯曲试验、划格试验,经优化热处理后,镀锌层附着力强,弯曲过程中无脱落、起皮现象,划格后无明显剥离,确保使用过程中不易出现镀层破损。疲劳性能测试通过模拟实际使用工况,施加循环载荷,优化热处理后的钢丝疲劳应力幅可达410MPa以上,疲劳寿命长,满足长期受力需求。镦头性能作为高强度钢丝的重要指标,经合理热处理后,钢丝镦头处无裂纹、断裂现象,满足锚固使用要求。若热处理不当,会导致镀层附着力下降、疲劳寿命缩短、镦头性能不合格,通过这些性能测试,可全面评价热处理工艺的合理性,确保产品满足不同应用场景的综合要求。

4 热处理工艺优化与综合性能提升

4.1 基于微观结构与性能关联的热处理工艺优化

基于微观结构与性能关联的热处理工艺优化,需以微观结构分析与性能测试数据为核心依据,建立参数-结构-性能的关联模型,实现工艺参数的精准调控。首先通过光学显微镜、扫描电子显微镜及X射线衍射分析,明确不同热处理参数下的微观结构特征,包括晶粒尺寸、索氏体含量、合金层厚度及物相组成等;同时结合力学性能、耐腐蚀性能及其他性能测试结果,分析微观结构与各项性能的内在联系,确定影响性能的关键微观因素。针对现有工艺存在的问题,如晶粒粗大、组织不均、镀层结合不牢固等,通过调整加热温度、保温时间、冷却速度及走线速度等参数,优化微观结构:细化晶粒,提高索氏体含量,控制合金层厚度均匀,减少异常组织与缺陷。优化过程中采用逐步调整、反复测试的方式,确保每一项参数调整都能实现微观结构的改善与性能的提升,最终形成最优的热处理工艺方案。

4.2 优化后热处理工艺的验证与应用

优化后热处理工艺的验证与应用是确保工艺可行性

与实用性的关键环节,需通过系统的试验验证与实际生产应用,检验工艺优化效果,确保产品质量稳定可靠。验证试验阶段,按照优化后的工艺参数进行热镀锌钢丝的制备,通过微观结构分析确认组织均匀性、晶粒尺寸及镀层结合状态符合要求;通过全面的性能测试,验证抗拉强度、耐腐蚀性能、疲劳性能等指标是否达到设计目标,与优化前工艺相比,性能提升效果是否显著,同时检验工艺的稳定性,确保不同批次产品性能波动在允许范围内^[4]。验证合格后,将优化后的工艺应用于实际生产,调整生产线上的相关设备参数,实现工艺的连续化生产,同时建立生产过程中的质量监控体系,定期检测微观结构与性能,及时调整参数,避免缺陷产生。通过实际应用,进一步完善工艺细节,降低生产成本,提升生产效率,使热镀锌钢丝的综合性能满足高端领域需求,扩大产品的市场竞争力。

结束语

热镀锌钢丝热处理工艺对其微观结构与性能影响重大。通过多种分析手段明确了工艺参数与微观结构的联系,以及微观结构和性能的关联。基于这些研究进行工艺优化,经严格验证与应用,成功提升了钢丝综合性能。未来可进一步探索新工艺、新技术,持续优化热镀锌钢丝性能,满足不断变化的市场需求,推动相关行业高质量发展。

参考文献

- [1]张菊辉,吕刚,衣存浩,等.超高强热镀锌钢丝的腐蚀行为[J].材料科学与工程学报,2025,43(1):9-15.
- [2]苗立贤,苏笑博,任军杰,等.热镀锌钢丝生产工艺的环保及数智化改造技术[J].成组技术与生产现代化,2025,42(1):21-24.
- [3]贾良生.新型热镀锌钢丝技术的应用研究[J].山西冶金,2023,46(1):167-168.
- [4]王钺涵,于喜彬,王占学,等.热镀锌钢丝生产过程中锌渣的形成原因及其控制措施浅析[J].电镀与精饰,2025,47(8):113-116.