

热镀锌钢丝镀层微观结构与耐腐蚀性能的关联性研究

宫明江¹ 李国海¹ 于茂来^{2*} 李加革¹

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

摘要: 热镀锌钢丝广泛应用于多领域,其镀层微观结构与耐腐蚀性能紧密相关。本文介绍热镀锌工艺、镀层微观结构表征方法及不同工艺下微观结构特征,阐述了耐腐蚀性能测试方法与不同工艺下的性能表现。深入分析晶粒尺寸、相组成、致密度与耐腐蚀性能的关联,提出基于微观结构调控、添加合金元素及优化后处理工艺等提升耐腐蚀性能的建议,为热镀锌钢丝生产与应用提供参考。

关键词: 热镀锌钢丝; 镀层微观结构; 耐腐蚀性能; 合金层; 电化学测试

引言: 热镀锌钢丝凭借出色的防腐性能,在桥梁缆索、建筑、通信等众多领域发挥着关键作用。其耐腐蚀性能直接决定着钢丝的使用寿命与可靠性,而镀层微观结构是影响耐腐蚀性能的核心因素。深入探究镀层微观结构与耐腐蚀性能之间的关联性,有助于精准优化热镀锌工艺,提升钢丝质量。基于此,本文围绕这一主题展开系统研究,以期为行业发展提供理论支持与实践指导。

1 热镀锌钢丝镀层的制备与表征

1.1 热镀锌工艺概述

热镀锌是热镀锌钢丝生产的核心防腐工艺,因成本低、防护效果好,广泛应用于桥梁缆索、建筑、通信等领域。其原理是将预处理后的钢丝浸入熔融锌液,通过铁锌原子扩散与反应,在钢丝表面形成致密锌镀层,发挥牺牲阳极保护作用,隔绝外界腐蚀介质。基本流程包括预处理、热浸镀和后处理。预处理通过酸洗、碱洗去除钢丝表面杂质,助镀提升润湿性;热浸镀需严格控制锌液温度、浸镀时间等参数;后处理经冷却、钝化提升镀层性能。现代热镀锌工艺分连续式和间歇式,连续式因效率高、镀层质量稳定,适用于规模化生产,且通过“三度控制”等技术提升镀层性能,满足不同需求^[1]。

1.2 镀层微观结构表征方法

镀层微观结构表征是评估热镀锌钢丝质量的关键。多种检测技术结合可全面掌握镀层晶粒形态、相组成等。扫描电子显微镜(SEM)能清晰观察镀层表面及截面形貌,搭配能谱分析(EDS)可测定元素含量及分布。X射线衍射技术(XRD)用于分析镀层相组成,识别纯锌相、铁锌合金相种类及含量。金相显微镜观察金相组

织,评估晶粒细化程度;显微硬度测试反映镀层致密度和力学性能;镀层厚度测量辅助判断均匀性。这些方法相互补充,形成完整微观结构评价体系,为工艺优化和性能提升提供可靠数据支撑。

1.3 不同工艺条件下镀层的微观结构特征

热镀锌工艺参数影响镀层微观结构,锌液温度、浸镀时间、冷却速率及锌液成分是关键因素。锌液温度455℃-465℃时,镀层晶粒均匀细小,相组成以锌相为主,界面结合紧密;温度过高,合金层增厚、晶粒粗大,甚至镀层脱落;温度过低,镀层不均匀、漏镀。浸镀时间过长,生成过多脆性铁锌合金相,降低韧性;时间过短,镀层薄、致密度不足。冷却速率过快,晶粒细化但易产生微裂纹;速率过慢,晶粒粗大、致密度下降。锌液中铝元素含量0.13%-0.22%时,可形成抑制层,优化镀层微观结构,提升界面结合力。

2 热镀锌钢丝的耐腐蚀性能测试

2.1 耐腐蚀性能测试方法

热镀锌钢丝的耐腐蚀性能是其核心使用性能,需通过科学的测试方法模拟实际服役环境,全面评估镀层的防护效果。常用的测试方法主要分为加速腐蚀试验和电化学测试两大类,其中加速腐蚀试验以中性盐雾试验最为普遍,通过模拟海洋、工业大气等腐蚀环境,将钢丝置于含氯化钠的盐雾箱中,观察镀层的腐蚀速率、表面状态及红锈出现时间,该方法操作简便、效率高,能快速对比不同工艺下镀层的耐腐蚀差异,如悬索桥主缆钢丝腐蚀测试常采用此方法进行长期加速试验。干湿循环盐雾试验则可模拟热带海洋浪花飞溅区环境,更贴近实际服役场景,通过交替的干湿环境,加速镀层腐蚀,评估其长期防护性能^[2]。电化学测试包括Tafel直线外推法、交流阻抗法等,可定量分析镀层的腐蚀电流密度、极化

通讯作者: 于茂来,男,1970年7月出生,汉族,籍贯:天津,职位:生产副总经理,职称:中级工程师,学历:本科,研究方向:金属材料与热处理。

电阻等参数，精准反映镀层的电化学腐蚀特性，其中 Tafel 直线外推法可直接计算腐蚀速率，交流阻抗法能评估镀层的致密性及腐蚀过程中的界面变化。

2.2 不同工艺条件下镀层的耐腐蚀性能

不同热镀锌工艺条件下，镀层的微观结构差异直接导致其耐腐蚀性能呈现显著区别。在最优锌液温度（455℃-465℃）和浸镀时间（30-60s）下，镀层晶粒细小、致密度高，铁锌合金层厚度适中，耐腐蚀性能最优，中性盐雾试验中红锈出现时间可延长至500小时以上。当锌液温度过高（超过470℃），镀层晶粒粗大、合金层过厚且存在微裂纹，腐蚀介质易通过裂纹渗透至基体，导致腐蚀速率加快，相同盐雾试验条件下，腐蚀速率较最优参数提升30%以上。浸镀时间过短（不足20s），镀层较薄且存在漏镀缺陷，无法有效隔绝腐蚀介质，耐腐蚀性能大幅下降；时间过长（超过80s），脆性合金相增多，镀层易开裂，腐蚀速率也会明显上升。冷却速率过快（超过30℃/s）产生的微裂纹，会降低镀层耐腐蚀性能，使腐蚀速率增加12%左右；添加适量铝元素（0.13%-0.22%）可显著提升耐腐蚀性能，锌铝合金镀层的耐蚀能力是纯锌镀层的2-3倍。

3 镀层微观结构与耐腐蚀性能的关联性分析

3.1 晶粒尺寸与耐腐蚀性能的关系

镀层晶粒尺寸是影响热镀锌钢丝耐腐蚀性能的关键微观因素，二者呈现明显的正相关关系，即晶粒越细小，镀层的耐腐蚀性能越好。晶粒细小的镀层，晶界数量显著增多，晶界可有效阻挡腐蚀介质的渗透，延长腐蚀介质到达钢丝基体的路径，同时细小晶粒能减少镀层内部的应力集中，降低微裂纹产生的概率，从而提升镀层的防护稳定性。当镀层晶粒尺寸从10μm减小至2μm时，晶界密度大幅增加，腐蚀介质的扩散阻力显著提升，中性盐雾试验中腐蚀速率可降低40%以上。反之，晶粒粗大的镀层，晶界数量少，腐蚀介质易沿晶界快速渗透，且粗大晶粒内部易产生缺陷，导致镀层局部腐蚀加快，进而引发整体腐蚀失效。此外，晶粒均匀性也会影响耐腐蚀性能，晶粒分布均匀的镀层，腐蚀过程更均匀，可避免局部腐蚀集中，而晶粒大小差异较大时，易在晶粒粗大区域形成腐蚀优先位点，降低整体耐腐蚀性能。

3.2 相组成与耐腐蚀性能的关系

热镀锌钢丝镀层的相组成主要包括纯锌相和铁锌合金相，部分优化工艺下还会出现锌铝合金相，不同相组成的比例及分布直接决定镀层的耐腐蚀性能。纯锌相具有良好的牺牲阳极保护作用，致密的纯锌相可有效隔绝腐蚀介质，是镀层耐腐蚀的核心；铁锌合金相（如

FeZn7、FeZn13）则脆性较大，若合金相含量过高，会导致镀层韧性下降、易开裂，腐蚀介质易通过裂纹渗透，降低耐腐蚀性能。研究表明，纯锌相含量占比在70%以上时，镀层耐腐蚀性能最优；当铁锌合金相含量超过40%，镀层腐蚀速率会显著提升^[3]。锌铝合金镀层中形成的 Zn-Al 相和 Fe-Zn-Al 相，比纯锌镀层中的相结构更致密，耐腐蚀性更优，其耐蚀能力是纯锌镀层的2-3倍。另外，相组成的均匀性也很重要，相分布均匀可避免局部腐蚀集中，若某一相局部聚集，会成为腐蚀优先位点，加速镀层腐蚀失效。

3.3 致密度与耐腐蚀性能的关系

镀层致密度是衡量其耐腐蚀性能的核心指标，致密度越高，镀层内部的孔隙、微裂纹等缺陷越少，腐蚀介质（水、氧气、氯离子等）越难渗透至钢丝基体，镀层的防护效果越好。致密的热镀锌镀层可形成完整的防护屏障，使腐蚀介质只能在镀层表面发生反应，有效保护基体不受腐蚀，中性盐雾试验中红锈出现时间长，腐蚀速率低。反之，致密度低的镀层，内部存在大量孔隙和微裂纹，这些缺陷会成为腐蚀介质渗透的通道，腐蚀介质可通过孔隙快速到达基体与镀层界面，引发界面腐蚀，同时加速镀层剥离，导致钢丝基体发生腐蚀，显著缩短使用寿命。例如，当镀层致密度从90%提升至98%时，腐蚀介质的渗透速率可降低60%以上，镀层的腐蚀寿命可延长1倍以上。此外，镀层致密度还会影响牺牲阳极保护的有效性，致密镀层可确保锌元素均匀消耗，避免局部过度腐蚀，维持长期防护效果。

3.4 综合关联性分析

热镀锌钢丝镀层的微观结构（晶粒尺寸、相组成、致密度）与耐腐蚀性能之间存在复杂的协同关联，并非单一因素独立作用，而是相互影响、相互制约，共同决定镀层的整体防护效果。晶粒细小的镀层，通常致密度更高，相组成更均匀，纯锌相占比更合理，三者协同作用，可显著提升耐腐蚀性能；反之，晶粒粗大易导致致密度下降，同时诱发铁锌合金相过度生长，形成恶性循环，降低耐腐蚀性能。例如，锌液温度过高时，不仅会导致晶粒粗大，还会使铁锌合金相增多、致密度下降，最终导致腐蚀速率大幅提升。添加适量合金元素（如铝）时，可同时优化三者，细化晶粒、增加致密 Zn-Al 相、提升致密度，从而协同提升耐腐蚀性能。综合来看，晶粒细化、纯锌相（或锌铝合金相）占比合理、致密度高，是镀层具备优异耐腐蚀性能的核心条件，三者的协同优化是提升热镀锌钢丝耐腐蚀性能的关键方向。

4 优化热镀锌工艺提高耐腐蚀性能的建议

4.1 基于微观结构调控的工艺优化策略

基于微观结构与耐腐蚀性能的关联性,工艺优化的核心的是通过调控工艺参数,实现镀层微观结构的优化,进而提升耐腐蚀性能。首先,精准控制锌液温度和浸镀时间,将锌液温度稳定在455℃-465℃,浸镀时间控制在30-60s,避免温度过高或过低、时间过长或过短导致的晶粒粗大、合金相异常生长或致密度不足等问题。其次,优化冷却制度,将冷却速率控制在5℃/s-25℃/s,既能实现晶粒细化,又能避免过快冷却产生的残余拉应力和微裂纹,提升镀层致密度。同时,加强钢丝预处理环节的质量控制,通过优化酸洗、碱洗工艺,将钢丝表面残留碳含量降低至10mg/m²以下,提升表面清洁度,确保镀层与基体结合紧密,减少界面缺陷。此外,采用“双张紧+限径模”工艺,优化镀层厚度均匀性,避免局部镀层过薄或过厚,确保微观结构均匀一致,为提升耐腐蚀性能奠定基础。

4.2 添加合金元素的影响

在锌液中添加适量合金元素,是优化镀层微观结构、提升耐腐蚀性能的有效手段,其中铝、镍、稀土等元素应用最为广泛。铝元素是最关键的合金添加元素,将其质量分数控制在0.13%-0.22%,可在钢丝基体表面形成20-50nm厚的致密Fe₂Al₁₅抑制层,有效阻隔铁锌原子过度扩散,细化镀层晶粒,减少脆性铁锌合金相的生成,同时提升镀层致密度和附着力,显著增强耐腐蚀性能,且锌铝合金镀层在高应力下仍能保持良好的防护效果^[4]。添加适量镍元素(0.004%左右),可改善高硅钢镀锌时的“圣德林效应”,避免合金层异常增厚,优化相组成。稀土元素的添加可进一步细化晶粒,净化锌液,减少镀层内部缺陷,提升致密度和耐腐蚀性能。但需严格控制合金元素的添加量,过量添加会导致镀层出现漏镀、脆化等缺陷,反而降低耐腐蚀性能和力学性能。

4.3 后处理工艺的优化

后处理工艺是提升热镀锌钢丝镀层耐腐蚀性能的重要补充,通过优化后处理步骤,可进一步修复镀层缺陷、提升致密度和表面防护能力。首先,优化冷却工艺,采用分段冷却方式,先快速冷却至300℃左右,再缓慢冷却至室温,减少镀层残余应力,避免微裂纹产生,同时促进晶粒细化,提升致密度。其次,完善钝化处理工艺,采用无铬钝化技术,替代传统铬酸盐钝化,既符合绿色低碳要求,又能在镀层表面形成一层致密的钝化膜,有效阻隔腐蚀介质渗透,延长镀层腐蚀寿命。另外,增加稳定化处理环节,通过适当的温度保温和时效处理,消除镀层内部应力,改善相组成分布,提升镀层的韧性和附着力,减少使用过程中镀层开裂、剥离的概率。同时,加强后处理后的检测,及时剔除存在缺陷的产品,确保热镀锌钢丝的整体耐腐蚀性能达到使用要求。

结束语

热镀锌钢丝镀层微观结构与耐腐蚀性能关联紧密,晶粒尺寸、相组成、致密度等因素协同影响其防护效果。通过精准调控工艺参数、合理添加合金元素以及优化后处理工艺,可有效优化镀层微观结构,提升耐腐蚀性能。未来,随着研究的深入与技术的进步,热镀锌钢丝的质量将进一步提高,在更多领域发挥更大作用,满足日益增长的使用需求。

参考文献

- [1]彭安华,顾争光,张宜震,等.热镀锌工艺参数对钢丝镀层性能影响的分析[J].机械制造,2021,59(12):53-56.
- [2]吴长军,姚利丽,周志嵩,等.镀层中Fe含量对热镀锌钢丝湿拉行为的影响[J].热加工工艺,2022,51(18):89-92.
- [3]蒋红俊,韩俭.镀层结构对钢丝绳耐腐蚀性能的影响[J].金属制品,2022,48(6):29-31.
- [4]王海洋,王巍,王林烽.主缆缠绕用精密热镀锌异形钢丝研制[J].金属制品,2023,49(4):7-10.