

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.010

热镀锌丝调直开裂分析及改进措施研究

宫明江^{1*}, 王占学¹, 于茂来¹, 刘智贤¹, 边凤岚²,李艳伟³, 边福林⁴, 杜庆新⁵

(1. 天津华源线材制品有限公司, 天津 301636; 2. 太原科技大学 化学工程与技术学院, 山西 太原 030024;
3. 朝阳立德精密机械加工有限公司, 辽宁 朝阳 122000; 4. 辽阳新华标准件制造有限公司,
辽宁 辽阳 111000; 5. 扬中市永新镀业有限公司, 江苏 镇江 212299)

摘要: 低碳热镀锌钢丝是金属制品领域的重要产品。通过对开裂现象的宏观形貌和显微组织的观察, 本论文对低碳热浸镀锌钢丝调直开裂现象进行原因分析。试验结果表明, 钢丝开裂的主要原因是镀层中锌铁合金层过厚及调直压力过大。为此, 实验研究中系统调整了热镀锌生产工艺及镀后冷却工艺, 将镀层中的合金层厚度控制在 10~15 μm 范围; 同时, 调整了调直机轮型、距离等工艺参数。调整工艺后加工的低碳热浸镀锌钢丝未出现开裂现象。

关键词: 热镀锌丝; 调直开裂; 合金层厚度; 调直器

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

Analysis of straightening cracking of low-carbon hot-dip galvanized wire and the research on improvement measures

Gong Mingjiang^{1*}, Wang Zhanxue¹, Yu Maolai¹, Liu Zhixian¹, Bian Fenglan²,Li Yanwei³, Bian Fulin⁴, Du Qingxin⁵

(1. Tianjin Huayuan Wire Products Co., Ltd., Tianjin 301636, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Chaoyang Lide Precision Machinery Processing Co., Ltd., Chaoyang 122000, China; 4. Liaoyang Xinhua Standard Parts Manufacturing Co., Ltd., Liaoyang 111000, China; 5. Yangzhong Yongxin Plating Industry Co., Ltd., Zhenjiang 212299, China)

Abstract: Low-carbon hot-dip galvanized wire is an important product in the field of metal products. By observing the macroscopic morphology and microstructure of the cracking phenomenon, this paper analyzes the causes of straightening cracking in low-carbon hot-dip galvanized steel wire. The experimental results indicate that the main cause of steel wire cracking is the excessive thickness of the zinc-iron alloy layer in the coating and the excessive straightening pressure. Therefore, in the experimental study, the production process of hot-dip galvanizing and the post plating cooling process were systematically adjusted to control the thickness of the alloy layer in the coating at 10-15 μm . At the same

收稿日期: 2024-12-04

修回日期: 2025-01-20

通信作者: 宫明江(1978—), 高级工程师, 研究方向为先进金属材料涂镀、表面处理、新产品研发等,
email: gmj918@163.com

引用信息: 宫明江, 王占学, 于茂来, 等. 热镀锌丝调直开裂分析及改进措施研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 66-70.
Gong Mingjiang, Wang Zhanxue, Yu Maolai, et al. Analysis of straightening cracking of low-carbon hot-dip galvanized wire and the research on improvement measures[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 66-70.

time, process parameters such as straightening machine wheel type and distance were adjusted. The low-carbon hot-dip galvanized steel wire processed after adjusting the process did not exhibit any cracking phenomenon.

Keywords: hot-dip galvanizing; straightening cracking; thickness of alloy layer; straightener

低碳热镀锌钢丝是金属制品领域的重要产品,由焊接设备焊接成网片然后组装成养殖笼后,能够为养殖动物提供生长繁殖空间(见图1)。通常,钢丝需要经矫直、切断、折弯(部分)、焊接等工艺后形成网片,网片再经过冲孔、折弯等工序后组装成整体笼养系统。笼养系统可以充分利用立体空间,相比较在地面平养,节省了大量土地资源。另一方面,养殖的规模化、集约化和自动化对不同性能的低碳热镀锌钢丝的需求与日俱增,同时也对钢丝的防腐性能提出了更高的要求。其中,热镀锌是目前钢铁防腐腐蚀的主要手段之一,也是目前最成熟、应用最广泛的钢铁防腐蚀技术^[1-2]。大规格镀锌丝对生产设备能力要求较高,生产难度较大,因此该产品通常利用连续热浸镀锌工艺^[3],为钢丝表面热浸镀上微米级厚度的保护镀层^[4]。大量研究表明:致密的锌镀层能够使钢基体与大气隔绝,达到抑制基体腐蚀的目的;而当镀层破损时,锌镀层也可以作为牺牲阳极,优先发生腐蚀进而保护基体阴极;同时锌镀层腐蚀生成的氧化物、氢氧化物和各种碱式盐在基体表面的堆积将进一步增强镀层的阻隔作用^[5-7]。综上所述,热浸镀锌工艺能够大幅度提升金属制品的耐腐蚀性,从而显著提升金属材料的使用寿命,降低畜牧行业的养殖成本。



图 1 养殖笼外观照片

Fig.1 Appearance photo of breeding cage

1 问题描述

某终端客户在项目中使用直径为5.8 mm热镀锌丝产品作为鸡笼的笼门横梁,在开始调直过程中发现热镀锌丝产品出现了局部镀层剥离现象。随后研究人员对调直机进行参数调整后,热镀锌丝镀层剥离的情况得以好转,之后再次出现严重的镀层剥

离现象,造成用户无法使用,且开裂率高达90%,产品开裂后的外观形貌见图2。针对上述问题,本文进行了系统性原因分析,并提出了相应的改进措施。

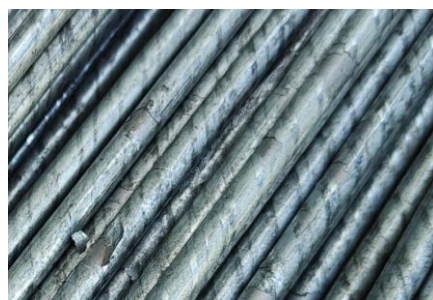


图 2 镀层剥离现象

Fig.2 Phenomenon of coating peeling

2 原因分析

2.1 开裂试样的物理性能分析

研究中采用德国布鲁克火花放电原子发射光谱仪分析得到盘条的化学成分(以质量分数计)为:0.142%含量的C, 0.221%含量的Si, 0.353%含量的Mn, 0.038%含量的P, 0.035%含量的S, 0.049%含量的Al, 余量为Fe, 基体材料满足产品设计要求。

按照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》测量盘条的力学性能,得到屈服强度和抗拉强度分别为325 MPa和475 MPa,断后延伸率为33%,满足设计要求。

同时测得热镀锌丝成品抗拉强度为692 MPa,断后延伸率为13.56%,满足客户要求,按照 GB/T 1839—2008《钢产品镀锌层质量试验方法》测量热镀锌丝,分别为312.7和289.4g/m²,满足客户要求。

2.2 开裂试样裂纹分析

采用体式显微镜观察热镀锌钢丝表面,发现锌层剥离处存在大量的螺旋状压痕,如图3所示。经分析可知,此压痕由钢丝调直过程中高速旋转的调制器造成。

图4为采用比例为1:1的盐酸+缓蚀剂溶液腐蚀去除表面锌层前后的照片。对比图片可知,钢丝镀层出现开裂后,下面的基体部分并未出现裂纹,说明钢丝镀层开裂时铁基体未发生开裂。

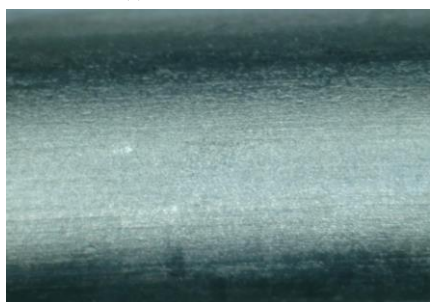


图3 热镀锌丝表面严重的螺旋状压痕

Fig.3 Severe spiral indentation on the surface of hot-dip galvanized wire



(a) 开裂试样去锌层前



(b) 开裂试样去锌层后

图4 开裂试样去除锌层前后的照片图像

Fig.4 Images of the cracked specimen before and after the removal of zincification layer

2.3 开裂试样的微观组织分析

采用金相显微镜观察试样开裂处的横截面形貌。如图5所示, 试样开裂处的合金层厚度为48.59 μm 。

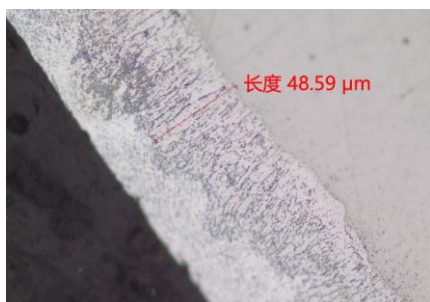


图5 开裂处合金层厚度

Fig.5 Thickness of the alloy layer at the crack region

2.4 正常试样的微观组织分析

采用金相显微镜观察未开裂处的横截面照片。如图6所示, 试样未开裂处的合金层厚度分别为12.21 μm 和15.96 μm , 且研究发现在部分位置的锌铁合金层中出现微裂纹。该样品按照GB/T 2976—2020《金属材料 线材 缠绕试验方法》完成芯棒直径为5.8 mm的缠绕试验时, 肉眼未见镀层出现开裂、脱落或起层到用裸手能擦拭掉的现象。经过大量的试验测量, 试样未开裂处的合金层厚度约占整个镀层厚度的20%~30%。

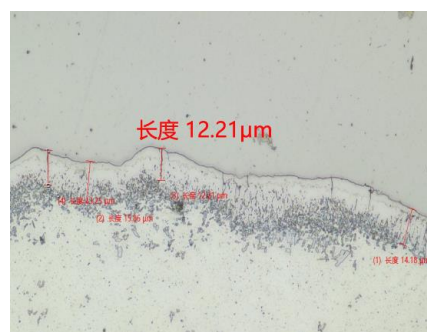
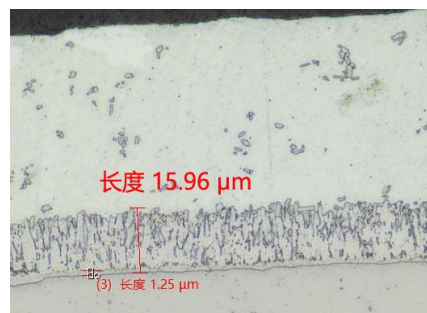
(a) 合金层厚度(12.21 μm)(b) 合金层厚度(15.96 μm)

图6 合金层厚度

Fig.6 Thickness of the alloy layer

李风等人已经证实, 低碳钢表面热浸镀锌层组织的镀层从基体向表面的相依次为 Γ 相、 δ_1 相、 ζ 相和 η 相, 且与基体结合处的 Γ 相呈白亮的线层, 靠近合金层部分呈牙齿状; 块状的 δ_1 相致密程度不同, 远离基体处的组织相对疏松; 棒状的 ζ 相分散在 η 相中^[8]。苗立贤等专家在《实用热镀锌技术》^[9]著作中也指出 Γ 相为脆性相, 硬度约为HV 493~515; 而 η 相为塑性相, 硬度为HV 37~50。较硬的 Γ 相在较慢的速度下完成缠绕试验时未见异常。原本存在于 Γ 相的微裂纹在外力的挤压情况下进一步扩展, 造成微裂纹的扩展延伸。 Γ 相的微裂纹较少时, 导致局部镀层开裂现象; Γ 相的微裂纹较严重时, 最终能够贯穿整个镀层, 导致最后的试样开裂现象。调直过程

中, 钢丝螺旋受力, 开裂的镀层最终与铁基体剥离, 严重时出现图3所示的现象。

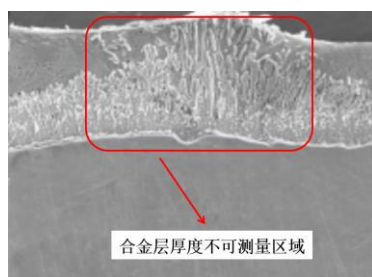
3 解决措施

基于热镀锌丝调直开裂的原因分析, 以控制合金层厚度和控制再加工过程为优选项, 从热镀锌丝生产工艺及调直工艺着手, 解决上述热镀锌丝调直开裂行为。具体措施如下:

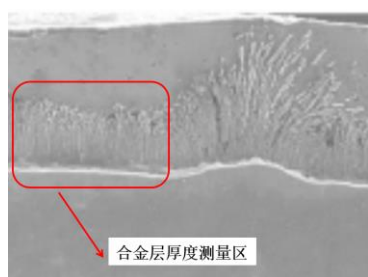
3.1 控制合金层的厚度

3.1.1 控制热镀锌时间

由于 η 相的厚度受到热镀锌池的浓度、热镀锌温度、热镀锌时间、浸镀结束后的水冷状态及热镀锌速度等多种因素的影响, 因此在实际分析过程中, 为避免误差, η 相厚度的测量结果仅供参考, 不予分析。而 Γ 相的厚度非常薄, 测量起来比较困难, 误差非常大, 也不予分析。本实验中仅分析热镀锌反应层中的两相 ζ 相和 δ 相以及由这两相组成的合金层的厚度, 如图7。



(a) 合金层厚度不可测量区域



(b) 合金层厚度测量区域

图 7 热镀锌合金层测量示意图

Fig.7 Schematic diagram of hot-dip galvanized alloy layer measurement

控制热镀锌反应时间的方式有以下几种:

(1) 控制热浸锌距离和引出速度。在相同的条件下, 热浸锌距离越短, 生产速度越快, 都会缩短钢丝在锌池内留存的时间。这种情况下, 可供锌铁扩散反应的时间减少, 从而镀层中漂移的 ζ 相来不及完全生长, 形成厚度较薄且致密的锌铁合金层;

(2) 控制热浸锌前钢丝浸入锌锅的温度。钢丝进入锌液以后很快与锌液之间发生热交换, 最终使钢丝自身的温度逐渐升高到与锌锅中整个锌液的温度基本一致。因此, 降低钢丝进入锌池时自身的线温, 增加热交换时间, 减少后续铁原子与液态锌开始进行扩散反应的时间, 从而减少合金层的生长时间;

(3) 控制钢丝离开锌池后的冷却水方式。钢丝离开锌液面, 其表面带出的液态锌温度下降并开始冷却, 进而一直冷却到锌的凝固点。在此期间, 铁原子与液态锌进行的扩散反应仍在进行, 且形成的锌铁合金层较之前更为粗大和松散。因此, 控制冷却方式和水流量, 对钢丝表面的镀层进行急速冷却, 能够抑制粗大松散的锌铁合金层的生成。

3.1.2 改善热镀锌前处理

当酸洗处理时, 铁基体表面较平缓, 而镀锌反应时 ζ 相呈栅栏状, 并且以接近平行的形态密集排列, δ 相的形貌也比较均匀, 在厚度变化上不存在较大的起伏。而抛丸作为镀锌前处理时, 不同的入射速度、抛丸时间及钢球直径^[10]会导致铁基体表面出现不同程度的凸起和凹陷^[11]。在钢基表面凸起处会导致表面有效锌铁反应长度增加, ζ 相呈爆发状态(如图8)。由于爆发状态的 ζ 相的厚度可能会贯穿整个镀层, 且其不能代表整个热镀锌层的变化趋势, 因此在测量镀层中各相厚度时, 不能计算钢基表面凸起处爆发状态的 ζ 相。因此, 研究中仅对平缓表面处呈均匀平行排列的 ζ 相的厚度进行测量分析, 且爆发状的 ζ 相也解释了调直后钢丝局部开裂的原因。

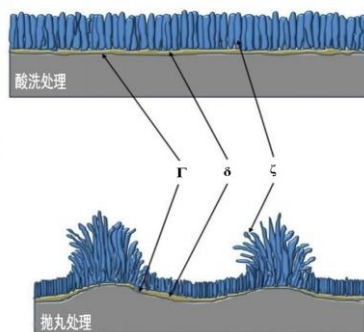


图 8 不同前处理对热镀锌组织的影响示意图

Fig.8 Schematic diagram of the effects of different pretreatments on hot-dip galvanized microstructure

因此, 热镀锌前将抛丸前处理改为超声波酸洗前处理^[12], 控制适宜的酸洗温度、酸洗时间、酸洗

浓度、温度及酸中亚铁离子的浓度,降低甚至杜绝爆发状态的 ζ 相的产生,进而降低部分位置合金层的厚度。

3.2 控制调直过程

由图3可见,热镀锌丝表面存在大量且严重程度不同的螺旋状面摩擦及压痕,此压痕为调直过程中由于调直模块压力较大造成。模块调整前后如图9所示,通过调整调直轮的尺寸及间距、偏心轮参数等工艺,所获得的钢丝表面的压痕明显减少。



(a) 模块调整前形貌图



(b) 模块调整后形貌图

图9 模块调整前后的图片

Fig.9 Images of the module before and after adjustment

4 结论

热镀锌丝调直性能受基体表面组织状态及镀层中合金层厚度影响较大,脆性的合金层过厚容易引起后期调直过程的开裂现象。因此,热镀锌过程中应当以合金层厚度作为调整工艺的依据,形成标准化控制方案,严格控制相关的生产过程,进而减少不良品的产生;

热镀锌后,调直设备会加剧产品的开裂现象。因此,生产过程中需要对不同丝径及调直轮等工作

参数进行合理的匹配,进而减少外力对镀层摩擦及调直性能的影响。

参考文献

- [1] 张启富, 刘邦津, 黄建中. 现代钢带连续热镀锌[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 626-630.
- [2] 吴光治, 陈志远. 带钢热镀锌及其保护气体的技术发展[J]. 四川冶金, 2010, 32(5): 25-27.
- [3] 刘邦津, 顾国成. 热浸镀[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989: 20.
- [4] 刘源. 宝钢高强热镀锌钢板镀层相结构的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2001.
- [5] Prosek T, Persson D, Stouilil J, et al. Composition of corrosion products formed on Zn-Mg, Zn-Al and Zn-Al-Mg coatings in model atmospheric conditions[J]. Corrosion Science, 2014(86): 231-238.
- [6] Thierry D, Persson D, et al. Long-term atmospheric corrosion of Zn-5% Al-coated steel and HDG during outdoor worldwide exposures[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2020, 55(7): 520-530.
- [7] Persson D, Thierry D, Karlsson O. Corrosion and corrosion products of hot dipped galvanized steel during long term atmospheric exposure at different sites world-wide [J]. Corrosion Science, 2017(126): 152-165.
- [8] 李风, 李殿凯, 李明喜, 等. 低碳钢表面热浸镀锌层的组织[J]. 热处理, 2011, 26(1): 45-49.
- [9] 苗立贤, 苗瀛. 实用热镀锌技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 14-18.
- [10] 黄河, 杨帆, 高玉魁. 喷丸除锈过程及效果的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 194-201.
- [11] 李娇娇. 钢基表面状态对热镀锌层组织的影响[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [12] 段述苍, 邢建东, 余大兵, 等. 超声波清洗技术在清除退火表面氧化物上的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2006(4): 86-88.