

热镀锌钢管表面灰暗层成因分析及综合防治措施

康莲薇^{1,2} 朱正¹ 侯静^{*}

1. 河北工程大学材料科学与工程学院; 2. 邯郸市萃博科技有限公司

摘要: 热镀锌钢管因其优良的耐腐蚀性能被广泛应用于建筑、给排水、电力及交通等工程领域,但在实际生产与储运过程中,镀层表面易出现灰暗层(黑斑)缺陷,严重影响产品外观质量及服役可靠性。针对该问题,本文从生产全流程视角出发,系统分析了热镀锌钢管表面灰暗层的形成机理。研究表明,钢管基材化学成分及组织状态、前处理工艺稳定性、锌液成分与热浸镀锌参数控制以及后处理和储运环境条件,是影响灰暗层形成的关键因素。在此基础上,围绕原材料筛选、脱脂酸洗与助镀控制、锌浴微合金化调节、浸锌工艺参数优化及储运防护等环节,提出了具有工程可操作性的综合防治措施。研究结果可为热镀锌钢管生产过程中表面质量缺陷的系统治理提供理论依据和实践参考,对提升产品外观一致性和耐腐蚀性能具有重要意义。

关键词: 热镀锌钢管; 灰暗层; 成因机理; 工艺控制; 表面质量

热浸镀锌工艺因能够在钢铁基体表面形成连续致密的锌铁合金层与纯锌层,从而同时发挥屏蔽防护和电化学保护作用,已成为目前工程领域应用最广泛、综合性价比最高的钢铁防腐技术之一。热镀锌钢管广泛应用于建筑结构、给排水、电力输送、交通设施等领域,其耐腐蚀性能直接关系到工程结构的安全性与服役寿命。随着基础设施建设质量要求的不断提升,用户对热镀锌钢管的关注已由单纯的防腐性能逐步延伸至外观质量、镀层均匀性及长期稳定性等方面。

在实际生产过程中,热镀锌钢管表面常出现局部或大面积灰暗、无光泽的异常区域,行业内通常称之为“灰暗层”或“黑斑”。该类缺陷不仅严重影响产品的视觉质量和市场接受度,更重要的是,其往往伴随着镀层组织异常、生长失控或结合力下降,进而对耐蚀性能产生潜在不利影响。因此,灰暗层已成为制约热镀锌钢管产品质量提升和高端应用的重要技术瓶颈。

已有研究多从单一角度对灰暗层问题进行探讨,如钢中硅含量影响、酸洗工艺控制或锌液成分调节等,但在实际生产中,灰暗层的形成往往并非由单一因素导致,而是钢管基材特性、前处理工艺、热浸镀锌参数、后处理及储运环境等多环节耦合作用的结果。基于此,本文从生产全流程的系统视角出发,对热镀锌钢管表面灰暗层的形成机理进行系统梳理,并在此基础上提出具有工程可操作性的综合防治措施,以期为企业稳定提升产品质量、降低返修和报废率提供参考。

1 钢管基材质量对灰暗层形成的影响

钢管基材是热镀锌过程的反应主体,其化学成分、组织状态和表面质量直接决定铁-锌反应行为,是影

响灰暗层形成的根本因素。

化学成分对铁锌合金层的生长具有决定性作用。其中,硅元素是影响最为显著的因素。当钢中硅含量处于约0.10%~0.25%范围时,铁锌反应相对平稳,合金层结构较为致密;而当硅含量超过该范围后,易发生典型的Sandelin效应,导致 ζ 相快速生长并向表面延伸,使镀层外观呈现粗糙、灰暗状态。由于现代炼钢工艺中硅作为脱氧剂广泛使用,若原料筛选控制不严,极易为灰暗层埋下隐患。

碳、磷、硫等元素同样会对镀层质量产生重要影响。较高的碳含量会加剧铁在锌液中的溶解,促使脆性合金相增厚;磷元素对铁锌反应的促进作用尤为明显,其与硅共同作用时,会显著放大合金层的异常生长趋势;硫元素则易在界面形成脆性硫化物夹杂,削弱镀层与基体之间的结合力。这些因素叠加后,往往导致镀层结构疏松、色泽发暗。

钢管表面状态对镀层形成具有直接影响。轧制过程中残留的氧化皮、油污和防锈剂若在前处理阶段未被彻底清除,会在局部区域阻碍锌液与钢基体的有效接触,形成反应不足或夹杂缺陷,最终在表面表现为黑斑。研究表明,即使极少量的油污残留,也可能引发明显的表面缺陷。此外,过高的表面粗糙度容易导致处理液滞留或气体包覆,使镀层厚度和光泽出现明显不均。

钢管内部组织均匀性和残余应力状态同样不可忽视。冷加工或焊接引入的残余应力在高温锌液环境下释放,可能诱发微观变形或裂纹,为锌液异常渗透和局部过度反应创造条件,从而在对应表面形成条纹状

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(区域科技创新体系项目)(246Z1001G)。

或片状灰暗区域。

2 前处理工艺对镀层质量的基础性作用

前处理工艺的核心目标是获得洁净、活化且具有良好的反应活性的钢铁表面,是决定热镀锌质量的奠基阶段。

脱脂除油是前处理的首要环节。当前工业生产中普遍采用碱性脱脂工艺,其效果受碱液浓度、温度及作用时间的共同影响。若脱脂不彻底,油脂残留将直接阻断后续酸洗和助镀反应;而参数控制不当则可能导致基体腐蚀或表面泛碱,从而影响镀层外观。因此,脱脂后设置充分的水洗工序,对防止工序间交叉污染具有重要意义。

酸洗工艺主要用于去除氧化铁皮和锈蚀产物,使钢表面暴露出活性金属基体。盐酸因反应效率高、残渣少而被广泛采用,但其浓度和温度必须严格控制。欠酸洗会造成局部残锈,而过酸洗则可能导致基体过度溶解、表面粗糙度增大,均不利于形成均匀镀层。随着酸洗过程的进行,溶液中 Fe^{2+} 浓度不断升高,当其接近饱和时,酸洗效率明显下降,并可能在表面形成附着残渣,因此需定期更换或再生酸液。

助镀工艺在酸洗与镀锌之间起桥梁作用,其目的是在钢表面形成一层均匀的氯化锌—氯化铵复合盐膜。助镀液的浓度、配比及清洁度对镀层质量影响显著。助镀液中 Fe^{2+} 含量过高,会导致锌液中锌渣增多,镀层表面变得粗糙灰暗。因此,需通过化学或电化学方法对助镀液进行持续除铁,并控制其pH值在适宜范围内。助镀后充分干燥不仅可以防止浸锌时发生爆锌现象,还能促进盐膜活化,提高铁锌反应的均匀性。

3 热浸镀锌核心工艺参数的影响机制

热浸镀锌过程是灰暗层形成与否的关键阶段,其本质为铁与液态锌之间的固—液扩散反应。

锌液成分对镀层结构和外观具有重要调控作用。在现代工艺中,通过向锌浴中添加适量镍元素,可以有效抑制高硅钢中Sandelin效应的发生,减缓合金层异常生长;铝元素则通过在钢表面形成抑制层,控制铁锌反应速率,并改善镀层光亮度。与此同时,锌液中铁杂质含量必须严格控制,过高的铁含量不仅会增加锌渣生成,还会恶化锌液流动性,使镀层表面粗糙发暗。

在工艺参数方面,浸锌温度通常控制在440~460℃范围内。温度过低会导致锌液流动性不足,而温度过高则会加剧铁锌互扩散,促使合金层过度生长。浸锌时间应根据钢管壁厚和钢种特性进行合理匹配,在保证结合力的前提下尽量缩短,以避免合金层失控

增厚。此外,工件提升速度对纯锌层厚度和表面平整性也具有重要影响,过快或过慢均可能导致外观质量下降。

4 后处理工艺与表面稳定性控制

4.1 冷却工艺:凝固组织的定格

镀后冷却是将高温下的镀层组织结构“固定”下来的过程。

冷却速度:冷却速度是关键隐形参数。冷却过慢(如空冷时间过长),相当于给了合金层继续向外生长的热力学条件, ζ 相可能突破表面形成灰暗层。冷却过快(如直接激冷),由于锌层与钢基的收缩系数不同,会产生巨大的内应力,导致镀层微裂纹甚至起皮,裂纹处易氧化发暗。

水冷控制:采用两段式冷却(先空冷几秒初步凝固,再进入25~45℃水槽)是理想选择。冷却水温需恒定,水温过高(>50℃)冷却能力不足,且易在表面留下水渍纹;水温过低易造成应力裂纹。智能温控冷却系统是未来方向。

4.2 钝化工艺:构建最后的防线

钝化是在镀锌层表面人为生成一层致密转化膜,以延缓存储和运输期间的“白锈”(碱式氧化锌)产生,白锈是灰暗层的前奏。

无铬钝化的发展:传统铬酸盐钝化(六价铬)效果佳但剧毒环保压力大。当前主流已转向三价铬钝化、硅酸盐钝化、钛锆体系等环保钝化技术。无论何种体系,控制核心都是pH值、浓度、温度和时间的稳定。

工艺控制要点:钝化液pH值(通常1.5~2.5)是成膜质量的命脉,需在线自动监测补加。浓度决定膜厚,需定期滴定维护。温度和时间影响反应速率,需匹配。钝化后必须经过两道逆流漂洗,彻底洗去残留酸和盐,然后快速彻底干燥(热风烘干),否则残留的潮气将在膜下引发腐蚀,直接形成黑斑。

5 储运与使用环境对灰暗层的影响

热镀锌钢管在完成生产工序后,其表面质量并非处于绝对稳定状态,储存、运输及安装环境仍会对镀层外观和结构完整性产生持续影响。锌作为活泼金属,在不利环境条件下容易发生氧化或腐蚀反应,进而诱发表面变色甚至形成局部灰暗区域,因此必须将质量控制理念延伸至产品全生命周期。

在储存环节,应优先选择干燥、通风良好的仓储环境,控制环境相对湿度在50%以下,避免高温高湿条件对锌层造成持续侵蚀。同时,应远离酸、碱、盐雾等腐蚀性介质,防止化学气氛对镀层产生不利影响。钢管堆放时应采用垫高方式,避免与潮湿地面直接接

触,并合理控制堆垛密度,以保证空气流通,减少水汽滞留。在雨季或梅雨季节,应尽量缩短库存周期,降低灰暗层和白锈生成风险。

在运输过程中,应采取有效的防雨、防潮及防机械损伤措施,优先选用洁净运输工具,并通过防锈纸、缠绕膜等方式对钢管进行适当包装。装卸和吊装过程中应使用尼龙吊带等柔性工具,避免钢丝绳或硬质器具直接接触镀层表面,防止产生划伤和局部破坏。

在安装与使用阶段,应尽量避免对热镀锌钢管进行二次切割或焊接操作;如不可避免,应对暴露部位及时进行锌修补或防腐涂层处理。同时,在设计和施工中应避免与铜、不锈钢等电位差较大的金属直接接触,以防止电偶腐蚀。在腐蚀环境较为严苛的工业区或沿海地区,可通过附加涂层等方式进一步提高服役安全性和外观稳定性。

6 结论

热镀锌钢管表面灰暗层的形成是多因素、多环节耦合作用的结果,贯穿于原材料选择、前处理、热浸镀锌、后处理以及储运使用的全过程。通过系统分析可以认为,严格控制钢管基材化学成分和组织质量是源头性措施;实现前处理和热浸镀锌工艺参数的精细化、稳定化控制是防止灰暗层形成的关键;而规范的后处理及储运管理则是保障产品长期外观质量的重要补充。未来,随着在线监测与智能控制技术的发展,通过数据驱动实现工艺参数的实时调节与预测性控制,

将为彻底降低灰暗层缺陷、提升热镀锌钢管整体质量水平提供新的技术路径。

参考文献:

- [1] 邵大伟,贺志荣,张永宏,等.热浸镀锌技术的研究进展[J].热加工工艺,2012,41(06):100-103.
- [2] 卢锦堂,孔纲,陈锦虹,等.热浸镀锌性能及质量要求[J].材料保护,2000,(03):21-23.
- [3] 蔡英才.热浸镀锌板黑斑产生的原因及判定初探[J].中国商检,1998,(02):22-23.
- [4] 姚舜,马幸江,田耕,等.热浸镀锌板表面麻点缺陷的分析[J/OL].热加工工艺,1-4[2025-12-01].<https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20230284>.
- [5] 严定峰,吴广新,陈光.热浸镀锌层表面黑点缺陷形成机理[J/OL].上海金属,1-9[2025-12-01].<https://doi.org/10.19947/j.issn.1001-7208.2025.05.12>.
- [6] 刘琦,谢孝文,徐新叶,等.热浸镀锌工艺及其助剂的研究进展[J].江西科技师范大学学报,2022,(06):28-33.
- [7] 吴悔,吴长军,刘亚,等.表面预氧化温度对球墨铸铁热浸镀锌层组织的影响[J].材料保护,2022,55(03):7-13.
- [8] 张玉,杜林,段学利,等.批量热浸镀锌自动化生产线的设计[J].现代制造技术与装备,2023,59(02):200-204.
- [9] 孟凡月,苗正坤,张静,等.热浸镀锌板锌层缺陷影响因素及控制方法[J].涂层与防护,2023,44(11):29-35.