

热镀锌低碳钢表面亮点缺陷 原因分析与控制

Analysis and Control of Bright Spot Defects on Surface of Hot-dip Galvanized Low-carbon Steel

供稿|刘晓峰, 李鸿友, 魏春新, 顾忠帅, 张晶晶, 闵铜 / LIU Xiaofeng, LI Hongyou, WEI Chunxin, GU Zhongshuai, ZHANG Jingjing, MIN Tong

内容导读

热镀锌低碳钢在实际应用中最为广泛,但带钢表面存在的亮点缺陷对冲压成型、电泳涂装均会产生不利影响。通过场发射扫描电子显微镜、超景深数码显微镜对亮点缺陷的微观形貌和化学成分进行分析,并对现场工艺流程进行排查,确定带钢表面亮点缺陷的产生原因。研究表明,该亮点缺陷由出口活套张紧辊表面聚集的锌灰、锌粉压入造成。针对此类缺陷产生原因,结合产线实际,通过优化炉鼻子工艺,将炉鼻子露点从 -6°C 调整至 -10°C ,有效抑制炉鼻子内锌灰产生,抑制层更加均匀致密,提高锌层附着力。经过实践验证,采取优化措施后亮点缺陷大幅减少,带钢表面亮点缺陷率由21%降低至1.5%。

热镀锌低碳钢以其卓越的耐腐蚀性和良好的加工性能,在现代工业中,特别是汽车和家电制造领域,有着举足轻重的地位。然而,在热镀锌低碳钢的生产过程中,表面质量问题始终是一个关键的挑战^[1]。其中,带钢表面的亮点缺陷,不仅影响产品的外观美观度,更对其后续的冲压成型和电泳涂装等工艺造成不利影响^[2-3]。

随着市场竞争的日益激烈,客户对于热镀锌低碳钢的质量要求愈发严格。不仅期望其具备出色的力学性能,更要求其表面达到近乎完美的状态。因此,深入研究并有效解决带钢表面亮点缺陷问题,

对提高产品质量、增强企业市场竞争力具有极其重要的意义^[4-5]。

本文通过场发射扫描电子显微镜、超景深数码显微镜分析和现场工艺流程排查,揭示了亮点缺陷的形成原因,并提出针对性的控制措施,为热镀锌低碳钢的生产提供有力的技术支持。

实验材料及方法

本文以某钢厂镀锌产线生产的存在亮点缺陷的DC51D+Z热镀锌板为研究对象,其宽、高规格为 $0.7\text{ mm}\times 1510\text{ mm}$,钢板未镀锌前化学成分见表1。

作者单位:本钢板材股份有限公司冷轧总厂,辽宁 本溪 117016

表1 实验钢板化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.010~0.030	≤0.040	≤0.300	≤0.020	≤0.018	余量

镀层的厚度为双面 100 g/m², 表面无络钝化处理。

将含有亮点缺陷的样品切成 10 mm×10 mm 的方块, 使用丙酮将试样浸泡 12 min, 以去除表面的防锈油。使用日本 Keyence 公司生产的 VHX-S15 超景深数码显微镜对亮点缺陷的形貌进行观察, 利用德国 ZEISS 公司生产的 SUPRA55 型场发射扫描电镜对亮点缺陷进行微观形貌观察及能谱分析。

实验结果与分析

缺陷宏观形貌特征

亮点缺陷的宏观形貌如图 1 所示, 亮点缺陷在板面上大面积分布, 在频闪仪下从正面观察时并不明显, 从侧光观察则呈现为大小不一的亮点。亮点的尺寸为 80~180 μm, 触摸时无明显手感。值得注意的是, 亮点缺陷在整个板面均有出现, 表明其分布具有广泛性和随机性。

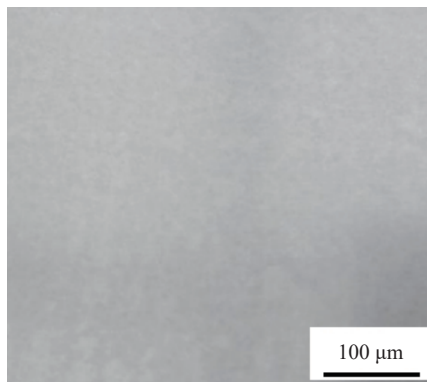


图1 亮点缺陷宏观形貌

缺陷微观形貌特征

亮点缺陷呈现出独特的微观形貌特征。如图 2(a) 所示, 亮点缺陷表面光滑, 且边界清晰, 同时缺陷边界存在部分光整纹, 这一特征表明亮点缺陷为光整工序后产生。进一步观察发现, 亮点缺陷尺寸为 105 μm, 呈规则椭圆形, 如图 2(b) 所示。正常镀层表面具有不规格的光整形貌, 亮点缺陷部位存在明显的凹坑(见图 2(c)), 凹坑深度约为 6 μm, 表明锌层受到异物压入导致锌层凹陷。

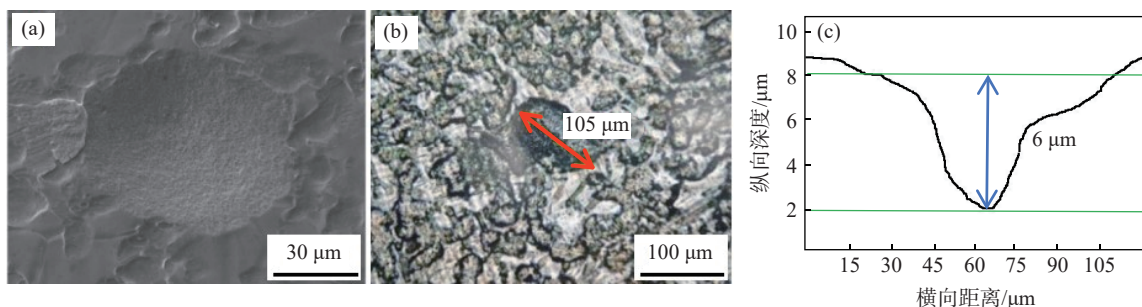


图2 亮点缺陷微观形貌: (a) 亮点缺陷高倍形貌; (b) 亮点缺陷低倍形貌; (c) 亮点缺陷深度曲线

缺陷微区能谱分析

为了探究亮点缺陷的化学成分, 对亮点缺陷部位表面和基板进行了微观形貌及能谱分析, 如图 3

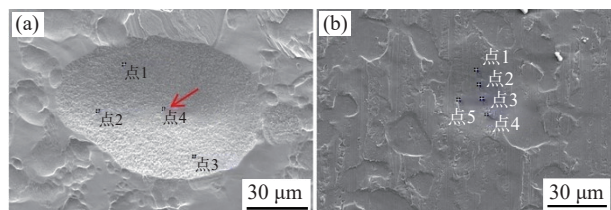


图3 亮点缺陷微区形貌及能谱分析位置图: (a) 亮点缺陷部位表面形貌; (b) 亮点缺陷部位基板形貌

和表 2 所示。亮点缺陷中心部位存在 O 元素、Zn 元素富集, 表明形成亮点缺陷的异物由 ZnO 及 Zn 粉组成。去除锌层后亮点缺陷部位基板能谱仪检测结果如表 3 所示, 缺陷处为 Fe 元素, 进一步证实了异物并非原料带入, 属于镀后缺陷。

表2 图3(a)所示亮点缺陷表面元素分析(质量分数) %

位置	C	O	Al	P	Fe	Zn
点1	3.12	0.82	0.44	0.30	0.76	94.56
点2	5.66	0.86	0.60	0.51	1.00	91.37
点3	5.77	1.10	0.74	0.57	1.78	90.04
点4	4.29	1.52	0.49	0.21	1.04	92.45

表3 图3(b)所示亮点缺陷基板元素分析(质量分数) %

位置	C	Al	Fe
点1	3.83	—	96.17
点2	4.03	1.20	94.77
点3	4.32	0.80	94.88
点4	4.18	—	95.82
点5	5.26	—	94.74

亮点缺陷排查分析及改善

现场排查

带钢的生产流程复杂且漫长,开卷后带钢需要依次经过入口区、清洗区、退火区、镀锌区、光整区、后处理区等工序,最终在出口区卷取成品^[6-8]。经过前期的分析,亮点缺陷主要产生在光整工序之后。为了精准定位亮点缺陷产生的具体环节,从光整区至出口区进行了细致的人工排查^[9-10]。

排查过程中通过频闪灯进行观察,发现带钢在后处理区并无亮点缺陷,但当带钢经过出口活套后,亮点缺陷清晰可见。

现场对出口活套区辊系进行深入排查时发现10#张紧辊表面出现了异物聚集(见图4)。对10#张紧辊表面异物进行能谱仪检测(见图5),元素分析结果如表4所示。检测发现张紧辊表面异物主要包含Zn、O元素。结合整个生产工序流程进行综合分析,推断异物主要为ZnO锌灰及Zn粉。亮点缺陷

的产生过程如图6所示,由于带钢表面镀层的ZnO及Zn粉脱落,堆积在张紧辊表面,形成近圆或椭圆状的凸起。当带钢经过张紧辊时,在两侧正压力的作用下带钢表面形成椭圆状压痕,压痕深度5~6 μm,从宏观角度观察呈现为点状亮点缺陷。

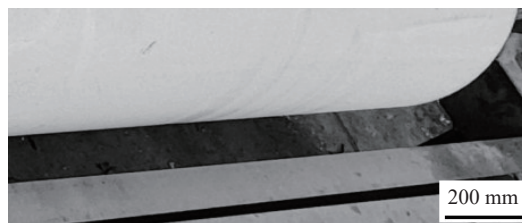


图4 出口活套10#张紧辊表面宏观形貌图

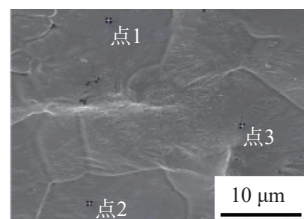


图5 张紧辊表面异物形貌与能谱分析位置

表4 张紧辊表面异物元素分析(质量分数) %

图5位置	C	O	Zn
点1	13.44	6.91	79.65
点2	11.78	6.75	81.47
点3	11.83	8.00	80.17

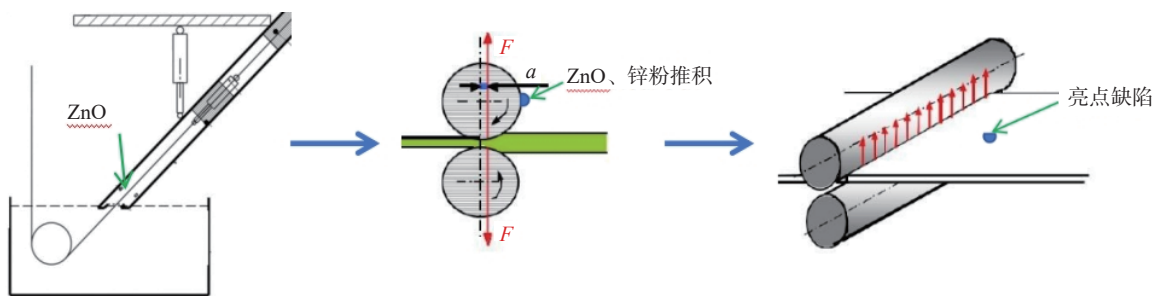


图6 亮点缺陷产生过程示意图

结合生产实践排查分析,发现ZnO主要是由炉鼻子锌灰形成在炉鼻子内部,由于存在烟囱效应,加快了锌液的挥发速度。锌液与炉鼻子中微量的氧发生氧化反应,生成ZnO颗粒,从而形成ZnO锌灰。这些锌灰会落在带钢表面,对镀锌过程中Fe与锌锅中的Al生成的 Fe_2Al_3 抑制层形成以及锌层的附

着产生不利影响。ZnO及Zn粉在出口活套段10#张紧辊表面聚集,在压力作用下最终形成亮点缺陷。

原因分析

➤ 炉鼻子内复杂的化学反应环境

在热镀锌生产过程中,炉鼻子内部的环境对锌

液的氧化和锌灰的生成起着至关重要的作用。炉鼻子内的高温环境以及微量氧气的存在,为锌液与氧气的反应创造了条件。当锌液在高温下挥发时,其与氧气的接触面积显著增大,加速了氧化反应的进行,从而生成大量的 ZnO 颗粒。这些 ZnO 颗粒若不能得到及时有效地清除,便会随着带钢的移动落在其表面。一旦 ZnO 颗粒附着在带钢表面,不仅会影响后续抑制层的形成,还会破坏锌层的均匀性和完整性,为亮点缺陷的产生埋下隐患。

张紧辊表面异物聚集的形成机制及危害

出口活套 10#张紧辊表面异物聚集是亮点缺陷产生的直接原因之一。在带钢的移动过程中,由于表面镀层的 ZnO 及 Zn 粉脱落,这些微小颗粒会逐渐堆积在张紧辊的表面。随着时间的推移,在张紧辊表面形成近圆或椭圆状的凸起。

当带钢经过张紧辊时,在张紧辊两侧正压力的作用下,这些凸起会被压入锌层,形成深度约为 $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 的压痕。压痕不仅破坏了锌层的平整度和完整性,还降低了锌层的附着力和耐腐蚀性。在后续的加工和使用过程中,这些压痕容易发展成为表面缺陷,影响产品的质量和性能。

光整工序对亮点缺陷产生的潜在影响

光整工序通常被用于改善带钢的表面平整度和粗糙度,以提高其力学性能和表面质量。然而在本研究中,亮点缺陷在光整工序后产生,表明光整工序可能在一定程度上对亮点缺陷的形成起到了促进作用。

光整过程中的压力分布不均、辊面状态不佳以及带钢运动速度不稳定等因素,均可能导致带钢表面受力不均。当带钢表面存在微小的缺陷或薄弱点时,这种不均匀的受力可能会进一步加剧缺陷的发展,导致亮点缺陷的出现。

现场改进措施及效果

为了从根本上解决亮点缺陷,采取了调整炉鼻子露点的改进措施。将炉鼻子露点从原来的 $-6\ ^\circ\text{C}$ 调整至 $-10\ ^\circ\text{C}$ 。通过调整露点,带钢表面的 ZnO 锌灰明显减少。这是因为降低炉鼻子露点能够有效降低炉鼻子内的氧分压,从而抑制 Zn 的氧化反应,减

少 ZnO 锌灰的生成。

由于带钢表面的 ZnO 锌灰减少,形成的 Fe_2Al_5 抑制层更加均匀致密,锌层与基体的结合力也得到了显著提升。图 7 所示为调整露点前后镀锌过程中形成的抑制层形貌,调整露点前抑制层断续不均匀,调整露点后抑制层均匀致密。经过这一改进措施,亮点缺陷大幅减少,带钢表面亮点缺陷率由 21% 降低至 1.5%。

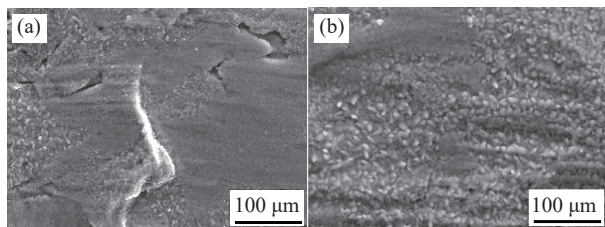


图 7 调整露点前后抑制层形貌: (a) 改善前; (b) 改善后

结束语

(1) 热镀锌低碳钢表面亮点缺陷呈现凹坑状,其深度为 $5\sim 6\ \mu\text{m}$,形状多为近圆状或椭圆状,在缺陷的中心部位氧元素富集。

(2) 亮点缺陷的产生并非单一因素所致,而是多个环节相互作用的结果。亮点缺陷产生于出口活套 10#张紧辊。在生产过程中, ZnO 和 Zn 粉在带钢表面脱落并聚集在张紧辊表面,形成异物。当带钢经过张紧辊时,在两侧的压力作用下,异物压入锌层形成压痕,导致亮点缺陷。

(3) 通过将炉鼻子露点从 $-6\ ^\circ\text{C}$ 调整至 $-10\ ^\circ\text{C}$,有效地减少了 ZnO 锌灰的生成。这一调整使得抑制层更加均匀致密,提高了锌层的附着力,有效减少了锌粉的脱落,带钢表面亮点缺陷的发生率从 21% 大幅降低至 1.5%。

(4) 热镀锌工艺的复杂性和多样性要求持续关注生产过程中的变化,不断优化工艺参数,加强质量控制和管理,以确保产品始终满足市场的高标准和严要求。

参考文献

- [1] 刘李斌, 蒋光锐, 马兵智, 等. 连续退火热镀锌板镀层表面黑点缺陷研究. 金属热处理, 2014, 39(9): 137

- [2] 徐国军, 胡华东, 田祥省, 等. DX56D+Z 镀锌超深冲钢常见表面缺陷分析. 热加工工艺, 2023, 52(1): 157
- [3] 赵晓萌, 王亮亮, 宋志超. 镀锌 O5 板典型麻点质量缺陷成因及控制. 山西冶金, 2021, 44(6): 85
- [4] 赵川翔, 冯辉雄, 吴科, 等. 合金化热镀锌钢板表面锌渣缺陷研究. 宝钢技术, 2022(6): 26
- [5] 张雷, 韩菲, 张亚琦, 等. 冷轧带钢轧后表面残留分析与改进. 山西冶金, 2021, 44(5): 177
- [6] 闫鹏. 热镀锌表面锌凸起的成因及其形成机制探讨. 冶金冶炼, 2020(14): 104
- [7] 王保勇, 鲁洋泽, 张晓峰, 等. 热镀锌汽车外板表面冲压亮点缺陷成因分析及对策. 河南冶金, 2018, 26(4): 17
- [8] 李伟刚, 赵云龙, 王滕, 等. 热镀锌钢板表面亮点缺陷成因分析与控制. 中国冶金, 2018, 28(10): 46
- [9] 王彭涛, 蒋光锐, 刘李斌. 热镀锌汽车板亮点缺陷研究. 热加工工艺, 2019, 48(8): 248
- [10] 杨宏伟, 刘春雨, 周研, 等. 热浸镀锌板表面锌渣缺陷成因及控制技术研究. 天津冶金, 2022(4): 33

作者简介: 刘晓峰 (1975—), 男, 副高, 总工程师, 主要从事冷轧及热镀锌汽车板技术。E-mail: Bxposcord-lxf@163.com。