生产实践

电镀锌汽车板表面亮带缺陷成因及解决措施

高洪刚，金鑫，曹洋，海超
（鞍钢集团本钢板材股份有限公司，辽宁 本溪 117001）

摘要：针对电镀锌机组生产宽幅低碳深冲钢汽车外板时出现的上表面亮带色差问题，采用光学显微镜、SEM、EDS及金相分析等手段进行系统研究。结果表明，该缺陷是由于冷轧基板表层存在异常粗大晶粒导致电镀锌过程中结晶异常，电镀结晶异常处为小亮点缺陷，大量亮点宏观表现为亮带色差。综合缺陷检验及工艺查询分析，确定热轧卷取温度高、卷取过程中助卷辊压力偏大导致热轧板表层出现粗大晶粒，热轧组织遗传导致冷轧基板表层晶粒粗大。采取卷取温度由750 ℃降至710 ℃，并优化助卷辊压力参数措施，成功消除了该缺陷，工艺优化后对成品组织性能无明显影响。

关键词：电镀锌；亮带色差；低碳深冲钢；粗晶
中图分类号：TQ153 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4613(2026)03-0057-05
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 03. 010

Causes and Solutions of Bright Band Defects on the Surface of Electro-galvanized Automotive Sheets

GAO Honggang, JIN Xin, CAO Yang, HAI Chao
(Bengang Steel Plates Co., Ltd. of Ansteel Group Co., Ltd., Benxi 117001, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the bright band color difference on the upper surface occurring during the production of wide low-carbon deep-drawing steel for automotive outer panels on the electro-galvanizing line, a systematic study was carried out by means of optical microscopy, SEM, EDS and metallographic analysis. The results showed that the defect was caused by abnormally coarse grains in the surface layer of the cold-rolled substrate, leading to abnormal crystallization during electro-galvanizing. The areas with abnormal electroplating crystallization appeared as small bright spot defects, and a large number of bright spots macroscopically manifested as bright band color difference. Through comprehensive defect inspection and process analysis, it was determined that the high hot rolling coiling temperature and excessive wrapper roll pressure during coiling resulted in coarse grains in the surface layer of the hot-rolled strip, and the heredity of the hot-rolled microstructure led to coarse grains in the surface layer of the cold-rolled substrate. By reducing the coiling temperature from 750 ° C to 710 ° C and optimizing the wrapper roll pressure parameters, the defect was successfully eliminated, and the process optimization had no significant effect on the microstructure and properties of the finished product.

Key words: electro-galvanizing; bright color difference; low-carbon deep-drawing steel; coarse grains

电镀锌汽车板因其卓越的耐腐蚀性和表面质量，既是高端乘用车车身外覆盖件的首选材料，又是汽车用户对其表面质量要求极为严苛的板材产品，板面任何微观缺陷均会直接影响成品外观品质[1-4]。鞍钢集团本钢板材有限公司电镀机组（以

高洪刚，正高级工程师，2004年毕业于内蒙古科技大学材料成型及控制工程专业。E-mail：yiming186@163.com

下简称“本钢电镀机组”）在生产电镀锌低碳深冲钢汽车外板时，成品上表面中部出现亮带色差缺陷，缺陷沿轧制方向呈带状分布，几乎通卷存在，该缺陷严重影响外板表面合格率，导致合同不能正常交付。本文通过系统的分析，确定了缺陷的产生机理，提出针对性改进措施，使该缺陷得到消除，确保汽车用户的稳定使用。

1 亮带色差缺陷

本钢电镀机组生产的电镀锌汽车外板批量出现表面缺陷问题，钢种为DC04E+Z（镀层50/50（g/m^2）），基板成分为低碳铝镇静钢，缺陷位于带钢上表面宽度方向中部，缺陷宏观形貌见图1。



图1 缺陷宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic Morphology of Defects

由图1可知，缺陷沿轧制方向呈亮（白色）带状色差，仔细观察亮带色差由许多微小白亮点组成，白点宽度小于1 mm，长度约1~3 mm。缺陷几乎通卷存在，主要分布在带钢宽度方向中部，轻重程度不一。

2 缺陷检验分析

2.1 光学显微镜观察分析

在缺陷位置切取40 mm×40 mm小样片，用超声波清洗表面，热风筒吹干后，采用光学显微镜对缺陷位置进行观察，缺陷位置的微观形貌见图2。由图2可知，缺陷位置在微观下由许多亮点组成，在缺陷位置存在较大的白亮大片结晶，根据光学显微镜初步分析确定，缺陷是由于电镀锌结晶异常导致。与正常区域均匀的镀层形貌相比，缺陷区域呈现片状异常结晶，这是导致宏观亮点的直接原因。

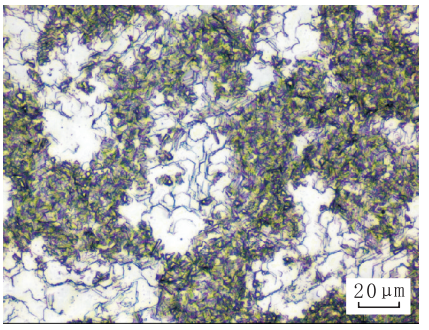


图2 缺陷位置的微观形貌

Fig. 2 Microscopic Morphology of Defect

2.2 SEM观察分析

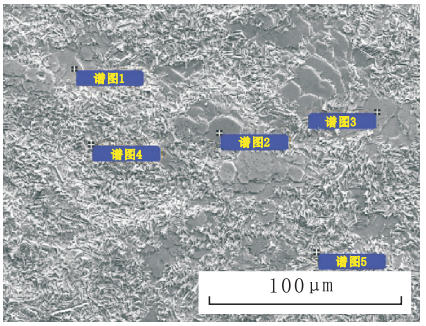
在缺陷位置切取30 mm×30 mm小样片，用超声波清洗表面，热风筒吹干后，采用SEM对缺陷位置进行观察，对锌层缺陷位置和正常位置进行EDS成分检测，缺陷位置扫描电镜及能谱分析见图3。由图3（a）可知，SEM微观形貌相比光学显微镜下更清晰地呈现出缺陷位置（谱图1、2、3）为大块片层状结晶，正常位置（谱图4、5）为无序细小结晶，由图3（b）可知，片状晶粒和细小晶粒位置的锌层成分无明显差异。综合以上分析，确定缺陷为电镀过程中大块片层结晶导致，对比成分检测可以排除锌液成分差异导致的结晶异常。

2.3 缺陷位置逐层腐蚀分析

在缺陷位置切取50 mm×30 mm小样片，用超声波清洗表面，热风筒吹干后，采用维氏硬度计，对缺陷位置进行打点标记，然后采用5%稀盐酸进行逐层腐蚀直至锌层腐蚀掉露出基板，缺陷位置去除锌层前后基板形貌如图4所示。由图4可知，缺陷位置去除锌层后基板表面无明显异常。采用SEM对缺陷进行观察，并对缺陷位置表面采用4%的硝酸酒精腐蚀，进行表面和截面金相对比分析，基板缺陷位置腐蚀后宏观及微观形貌如图5所示。由图5（a）可知，采用54%的硝酸酒精腐蚀后基板出现的宏观形貌缺陷与电镀后出现的宏观缺陷形貌相似，均沿轧制方向呈亮（白色）带状色差，由图5（b）和图5（c）可以发现缺陷位置存在明显粗大晶粒。

综合SEM、EDS及金相组织对比分析，冷轧电镀基板表面存在粗大的混晶缺陷，导致电镀后基板表层粗大结晶位置出现大量的片层结晶，因此在正常光照下产生镜面反射，缺陷位置比正常位

(a)

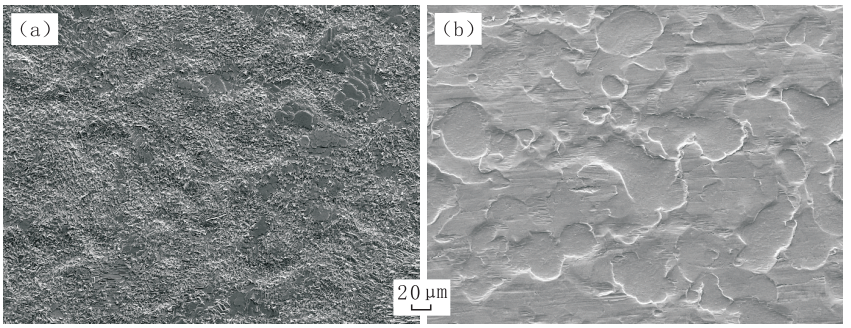


(b)

项目	C	P	Fe	Zn
谱图1	3.76	0.38	0.94	94.92
谱图2	3.77	0.40	0.97	94.86
谱图3	4.26	0.55	0.97	94.22
谱图4	3.51	0.40	0.92	95.17
谱图5	5.48	0.49	1.00	93.03
Max.	5.48	0.55	1.00	95.17
Min.	3.51	0.38	0.92	93.03

图3 缺陷位置扫描电镜及能谱分析

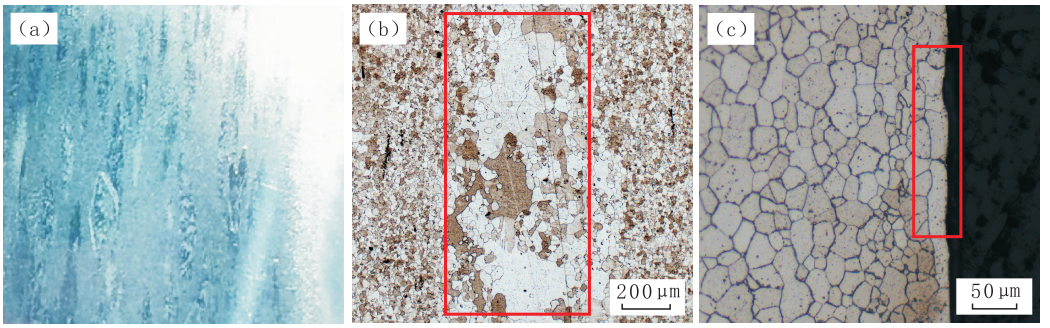
Fig. 3 Analysis on Defect Location by SEM and EDS



(a) 去除锌层前；(b) 去除锌层后

图4 缺陷位置去除锌层前后基板形貌

Fig. 4 Morphology of the Substrate at Defect Location before and after Zinc Layer Removed



(a) 宏观形貌；(b) 表层微观形貌；(c) 截面微观形貌

图5 基板缺陷位置腐蚀后宏观及微观形貌

Fig. 5 Macroscopic and Microscopic Morphology of Defects in Substrates after Corrosion

置光亮，大量的点状缺陷汇聚到一起形成宏观的亮带缺陷。

3 缺陷成因讨论与改进

3.1 缺陷成因讨论分析

缺陷成因为电镀锌原料的电镀基板(冷轧退火板)表面存在粗大异常晶粒，通过研究分析并借鉴行业同类企业处理相近问题的经验[5]，可以确定冷轧基板表面粗晶缺陷是由热轧基板遗传导致。由于热轧粗大的晶粒与细小的晶粒交界处晶界结合力较脆弱，在冷轧过程中，带钢表面受压应力和剪切应力的作用，粗细晶粒两侧应力分布不均，导致电镀基板粗晶晶界出现沿晶裂纹缺陷[6-7]。根据电镀锌沉积理论[8]，电镀过程中锌沉积优先在粗大晶粒的晶界微小裂纹处形核、长大，而且在电结晶初始阶段生长主要为外延生长，电结晶层有按原晶格生长并维持原有取向的趋势，导致基板表层粗大的晶粒处形

成与基板类似的大的片状结晶,大量的片状结晶在自然光下发生直接镜面反射出现白亮的点,而正常细小结晶部位在自然光下发生漫反射,宏观表现发暗。

电镀锌基板成分设计为常规低碳铝镇静钢,为确保深冲性能,热轧采用高温卷取工艺,冷轧为连续退火机组生产,并采用高温退火,电镀基板化学成分(质量分数)及热轧工艺见表1。对缺陷卷原料进行全工序工艺过程控制查询,各工序工艺控制严格按照要求执行。

表1 电镀基板化学成分(质量分数)及热轧工艺

Table 1 Chemical Composition (Mass Fraction) and Hot Rolling Process of Electroplated Substrates

化学成分/%						热轧工艺	
C	Si	Mn	P	S	Als	终轧温度/℃	卷取温度/℃
0.02~0.05	≤0.30	0.10~0.30	≤0.020	≤0.020	≥0.015	900	750

热轧原料表层粗晶的产生,通常是终轧温度偏低、精轧局部进入两相区,进而形成混晶缺陷所致。经核查工艺记录,终轧温度控制正常,900 ℃的目标温度远高于铁素体区温度(在常规生产的冷速下低碳铝镇静钢A_{r3}为850 ℃左右),同时缺陷发生部位为带钢宽度方向中部,轧制过程中温度较低的两个边部未出现该缺陷,结合工艺控制参数及缺陷分布位置综合分析,可排除终轧温度偏低是导致热轧板表面产生粗晶缺陷的原因。借鉴行业内关于低碳铝镇静钢热轧表面粗晶的研究成果[9],根据缺陷出现位置、形貌特征及热轧工艺设计要求,可以确定热轧粗晶缺陷产生是由于卷取温度偏高,同时卷取时助卷辊压力偏大导致。基板热轧卷取温度设定值为750 ℃,实际执行通卷基本在(750±15) ℃范围内,根据李润昌等人[10]对低碳铝镇静钢热镀锌表面粗晶缺陷形成原因及对策研究成果可知,C质量分数为0.03%,带钢卷取温度为730 ℃,卷取后带钢处于两相区(奥氏体+铁素体),产品温度设定值为750 ℃,温度高于A_1温度,钢卷宽度方向边部温降较大,而宽度方向中部温降慢,带钢长时间处于两相区(奥氏体+铁素体),导致奥氏体晶粒持续长大,同时大晶粒曲率半径更大,晶界迁移所需驱动力反而更小,处于优先长大的地位,会吞噬周围小晶粒形成较粗大的晶粒。带钢头尾冷速较大,但同样也出现粗晶缺陷,分析认为主要是卷取过程中助卷辊(夹送辊)压力偏大,会在带钢表层造成摩擦变形和应变积累,诱导相变并促进晶界迁移,导致晶粒的异常长大[11-12]。综合分析认为,粗晶缺陷为上述两方面因素共同作用产生。

3.2 改进措施及效果

针对该缺陷,热轧工序采取以下工艺优化措施:将卷取温度由750 ℃降低至710 ℃,避免带钢卷取后长期处于高温导致异常晶粒长大,以获得更为均匀的晶粒组织。同时调整卷取过程中的助卷辊压力参数,避免因机械应力过大诱发晶粒异常长大。针对此批合同补料生产,热轧采用上述措施,电镀锌成品表面未出现该缺陷。对优化前、后成品进行性能和组织对比检验分析,工艺优化前后典型钢卷性能见表2。

表2 工艺优化前后典型钢卷性能

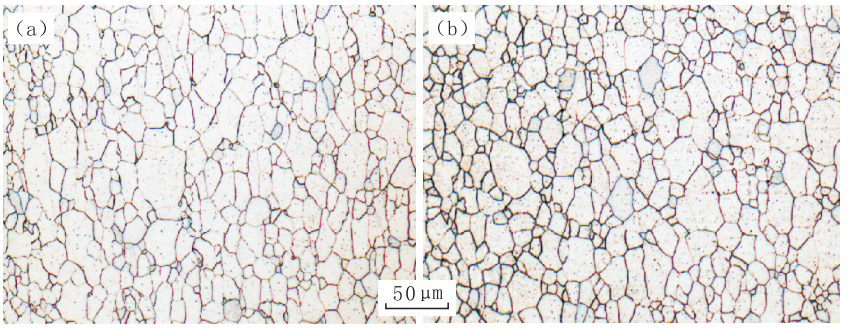
Table 2 Properties of Typical Steel Coil before and after Process Optimization

项目	规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
优化前	0.8	175	305	43.41
优化后	0.8	178	310	42
标准		120~210	270~350	≥38

由表2可知,优化前后典型钢卷性能均符合相应标准要求,且变化不明显。工艺优化前后典型钢卷的金相组织如图6所示,由图6可知,优化前后典型钢卷组织均为F+FeC_3,晶粒度为9.0~9.5级,综合评估后,确定工艺优化对产品组织性能未产生明显影响。

4 结论

(1)电镀锌低碳深冲钢表面亮带色差是大量的小亮点汇聚到一起形成的宏观缺陷,导致缺陷的直接原因是电镀锌微观结晶异常,大块片层结



(a) 优化前；(b) 优化后

图6 工艺优化前后典型钢卷金相组织

Fig. 6 Metallographic Structure of Typical Steel Coil before and after Process Optimization

晶定向生长，在正常光照下产生镜面反射，缺陷位置比正常位置光亮，大量的点状缺陷汇聚到一起形成了色差带。

（2）电镀锌冷轧基板表层出现粗大混晶晶粒，会使电镀成品镀层呈现片状结晶。经综合分析，热轧卷取温度（750 ℃）高于A_1温度，且卷取过程中助卷辊压力过大，二者共同作用使热轧基板表面形成粗大晶粒；该类晶粒经冷轧退火后难以消除，最终造成冷轧基板表层晶粒异常粗大。

（3）热轧工序采取卷取温度由750 ℃降低至710 ℃，同时调整卷取过程中的助卷辊压力参数，该缺陷得到消除，工艺优化对最终成品组织、性能无明显影响。

参考文献

[1] 王爱华，朱久发. 我国电镀锌板发展趋势的探讨[J]. 轧钢，2008，25(4)：39-42.
[2] 朱国森，韩赟，蒋光锐，等. 汽车车身用新型冷轧薄板研发进展[J]. 工程科学学报，2022，44(9)：1585-1594.
[3] 朱国森，蒋光锐，马家骥，等. 高鲜映性免中涂汽车外板制造关键技术及装备[J]. 中国冶金，2021，31(4)：123-125.
[4] 朱迎五，尹小文，杨鸿智. 根据ECB探讨车身轻量化技术趋势[J]. 汽车工艺师，2024(9)：42-46.
[5] 刘亮，桂洲，马珩嗥，等. 电镀锌板流星状白色亮斑缺陷的研究[J]. 武钢技术，2014，52(4)：22-24.
[6] 詹志东，黄成江，张玉妥，等. 带钢卷取温度与铁素体晶粒长大模拟[J]. 钢铁，2004，39(4)：25-29.
[7] 李朋欢，包燕平，岳峰，等. 异常粗大的奥氏体晶粒对表面晶间裂纹的影响[J]. 北京科技大学学报，2009，31(1)：177-181.
[8] 王玥，冯立明. 电镀工艺学（第二版）[M]. 北京：化学工业出版社，2018：33-37.
[9] 薛俊平，刘李斌，姚舜，等. 热轧低碳钢表层粗晶原因分析及控制[J]. 上海金属，2014，36(3)：6-10.
[10] 李润昌，肖茂元，齐达. 低碳铝镇静钢热镀锌表面粗晶缺陷形成原因及对策[J]. 轧钢，2018，35(4)：42-44.
[11] 李显，杨跃标，叶姜，等. 热轧低碳铝镇静钢表层粗晶缺陷原因分析及控制措施[J]. 轧钢，2020，37(5)：25-29.
[12] 邓凯，孟庆格，郑红星. 铝镇静钢连续退火相变行为与抗应变时效性能[J]. 中国冶金，2022，32(8)：82-88.

（编辑 白璐）

修回日期：2026-03-24

（上接第56页）

参考文献

[1] 刘跃飞. Q345B热轧钢板加工开裂的原因分析田[J]. 金属材料与冶金工程，2015，43(1)：20-23.
[2] 王飞. 高强度结构用钢在海洋工程结构中的应用研究[J]. 中国设备工程，2024(2)：252-254.
[3] 孙匮甫，冯阳，陈振业，等. 一种高强度多功能建筑结构用钢的耐蚀性及耐蚀机理[J]. 材料与冶金学报，2022，21(6)：28-34.
[4] 霍建生，秦红波，郑立康，等. 厚规格热轧带钢卷取温度控制精度研究[J]. 轧钢，2024，41(3)：111-116.
[5] 潘辉，周娜，李飞，等. Ti微合金化高强机械用钢控轧控冷工艺研究[J]. 轧钢，2013，30(3)：25-28.
[6] 蔡宁，鞠新华，邢阳，等. Ti微合金化700MPa级汽车大梁钢的研究[J]. 轧钢，2013，30(5)：5-9.
[7] 张志坚，杨鹏辉，李帅，等. Mn对高Ti低合金高强度钢Q355B组织性能影响[J]. 天津冶金，2021(3)：33-37.
[8] 李锐峰，赵旭，栾晖，等. 油气管道开裂原因[J]. 理化检验-物理分册，2022，58(12)：58-63.
[9] 李亮，黄磊，张鸿博，等. 某L485MB钢级天然气输送管线试压开裂原因分析[J]. 石油管材与仪器，2023，9(2)：81-86.
[10] 王飞，周少坤，王海涛，等. L360N天然气管道弯管的开裂原因分析[J]. 热加工工艺，2022，51(21)：151-154.

（编辑 白璐）

修回日期：2025-06-11