doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.03.016

家电用 Zn-11%Al-3%Mg 镀层钢板生产技术

金永清，周一林，罗 击，刘 怡

(攀钢集团攀枝花钢钒有限公司 板材厂，四川 攀枝花 617000)

摘要：介绍了攀钢锌铝镁机组主要装备和家电用 Zn-11%Al-3%Mg 镀层产品开发情况，探索了中铝锌铝镁镀层产品生产中清洗、炉鼻子控制、锌锅、气刀和镀后冷却等关键环节工艺技术；讨论了家电锌铝镁产品锌流纹、黑点、镀层斜纹、锌粒和条锌等顽固质量缺陷的产生原因和控制措施；通过调整，顺利开发了家电用 Zn-11%Al-3%Mg 镀层钢板。

关键词：Zn-11%Al-3%Mg 镀层；炉鼻子；锌流纹；黑点；锌渣

中图分类号：V241.07; TQ153.2 **文献标志码：**A

Production technology for Zn-11%Al-3%Mg coated steel for home appliances

JIN Yongqing, ZHOU Yilin, LUO Ji, LIU Yi

(Plate Factory, Panzhihua Steel & Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

Abstract: Zn-11%Al-3%Mg coated products for household appliances were produced by introducing a main equipment of Pan-Steel Zn-Al-Mg coating production line. The key process technologies in the production of medium-aluminum Zn-Al-Mg coating products, such as cleaning, furnace nose, zinc pot, air knife, and coating cooling, etc. were explored. It also discussed the causes and control measures of stubborn quality defects such as zinc flow lines, black spots, coating diagonal, zinc particles, and zinc streaks in household appliance Zn-Al-Mg products. Through research, Pan-Steel has successfully developed Zn-11%Al-3%Mg coated steel sheets for household appliances.

Keywords: Zn-11%Al-3%Mg coating; furnace nose; zinc flow lines; black spots; zinc slag

锌铝镁镀层钢板具有优异的耐蚀性、切口保护性、成形性和涂装性等性能，被业界认为是最具发展潜力的高耐蚀镀层钢板[1]，可以取代传统镀锌钢板而广泛应用于家电、建筑、光伏和汽车等领域[2-5]，应用前景广阔。根据铝的质量分数，锌铝镁镀层分为3类：即低铝型(1%≤Al≤5%)、中铝型(6%≤Al≤13%)和高铝型(47%≤Al≤57%)[6-7]。其中低铝锌铝镁广泛应用于家电和汽车领域，高铝锌铝镁用于彩涂和建筑领域。中铝锌铝镁主流产品分为Zn-11%Al-3%Mg 和 Zn-6%Al-3%Mg 两种。其中 Zn-11%Al-3%Mg中铝型锌铝镁镀层钢板因耐蚀性卓越主要用于光伏支架制造，同时因镀层综合性能良好，能满足家电对耐蚀性、成形性和涂装性等方面需求；但由于家电用钢板表面质量要求极高[8-9]，而中铝锌铝镁冷凝时镀层组织复杂[10-12]，容易产生锌流纹、黑点、镀层斜纹、锌粒、条锌等缺陷[13-16]。因此，国内还没有家电用Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板生产先例。

攀钢有3条热镀锌生产线，产品主要定位于家电板，因品种战略将一条热镀锌线改造成中铝锌铝

收稿日期：2025-04-17 **修回日期：**2025-06-26

通信作者：金永清(1974—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为涂镀工艺技术，e-mail：980227506@qq.com

引用信息：金永清, 周一林, 罗击, 等. 家电用 Zn-11%Al-3%Mg 镀层钢板生产技术[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(3): 123-128.
JIN Yongqing, ZHOU Yilin, LUO Ji, et al. Production technology for Zn-11%Al-3%Mg coated steel for home appliances[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(3): 123-128.

镁线，主要用于光伏用镀层钢板生产。为拓展家电板新品种，满足用户对表面及耐蚀性等不断提高的需求，攀钢在中铝锌铝镁产线进行了Zn-11%Al-3%Mg锌铝镁家电镀层钢板开发。通过开发，产品达到了知名家电企业认证标准，实现了商业化生产，成为国内第一条家电用Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板生产线，拓展了攀钢家电用钢板品种。

1　机组简介

1.1　工艺流程

生产工艺流程：上料→开卷→焊接→入口活套→清洗→退火炉→锌锅→气刀→镀后冷却→光整→拉矫→辊涂→出口活套→涂油→卷取→下线。

1.2　产品参数

攀钢热镀锌铝镁镀层机组产品参数见表1。

表 1　攀钢热镀锌铝镁镀层机组产品参数

Tab.1　Product parameters of Pan-Steel hot-dip Zn-Al-Mg coating production line

项目	参数值
带钢厚度/mm	0.25～2.50
带钢宽度/mm	720～1 250
镀层品种	中铝锌铝镁
性能品种	S350-S550，DX51D-DX54D
表面结构	光整
表面处理	无铬钝化、耐指纹、涂油
镀层双面厚度/(g•m^{-2})	60～400

1.3　机组装备特点

1.3.1　清洗槽

采用碱液清洗+机械刷洗+电解脱脂+软水漂洗等多级复合脱脂清洗工艺，碱液循环系统采用碱浓度在线检测、多级过滤和快速恒温加热等装置，清洗效率高，确保带钢在退火和镀锌时清洁良好的表面状态。

1.3.2　退火炉

美钢联法全辐射管立式连续退火炉，由预热段、辐射管加热、均热段、快冷段、保持段、热张辊室和炉鼻子段组成。炉膛和燃烧系统分离，防止燃烧系统中的氧气或水蒸气与带钢接触氧化，保证表面质量。燃烧系统采用高功率低排放环保型烧嘴，高效换热器、ON-OFF分区加热等先进装备和技术，保证高效均匀加热。炉内纠偏装置和凸度辊型，保证带钢对中及稳定运行。炉鼻子采用加湿器、排渣泵和摆动装置，起到抑制锌灰和排渣作用，提高炉鼻子内锌液面清洁度和镀层质量。

1.3.3　热镀段

陶瓷感应锌锅，配备有2个500 kW感应器和雷达液位检测装置，保证镀液温度和液位稳定受控。

DAK10E动态气刀采用多腔均压系统、氮气气源和感应式边缘挡板，具备平移、侧移、倾斜等水平移动功能，配合双螺旋碳化钨涂层沉没辊和高精度镀层测厚仪，保证镀层精度、均匀性和产品表面质量。

镀后分段式高流量移动冷却风箱，冷却能力强，可通过控制冷却速率，提高表面质量和镀层性能。冷却段采用刀唇喷嘴和荆棘分布喷管，可保证带钢均匀冷却和平稳运行，有利于提升表面质量。

1.3.4　镀后处理

光整机为四辊式液压压上式，最大轧制力800 吨，最大延伸率2%，配备湿光整和高压水洗辊系统，有利于改善带钢表面质量和力学性能；

辊涂段配备两套辊涂机，可实现不同钝化产品快速切换，固化系统采用近红外+热风烘干装置，实现带钢表面涂层快速加热和固化，保证膜厚性能。

涂油机采用静电涂油机，可实现带钢表面300～2 000 mg/m^{2}均匀涂油，防止钢卷在运输储存中氧化。

2　关键工艺技术控制

2.1　清洗工艺

清洗的目的是去除轧后带钢表面残油残铁，以清洁的表面进行热浸镀。Zn-11%Al-3%Mg镀液中Mg元素易氧化，导致浸润性下降，对基板表面清洗要求比普通镀锌更高。攀钢热镀锌铝镁机组采用“碱洗+刷洗+电解脱脂+软水漂洗”等多级复合式清洗工艺，在锌铝镁生产中对碱液浓度、清洗温度、刷辊压下量和脱脂电流进行了优化，提高了清洗效率，使带钢以洁净的状态进行热浸镀，提升镀层表面质量。

2.2　炉鼻子工艺

炉鼻子加湿是热镀锌铝镁生产中重要必备工艺，通过炉鼻子加湿，保护气体中的水分会与锌液面发生反应，在锌液面上形成一层薄而致密的ZnO膜以抑制锌蒸气的挥发，减少炉鼻子内壁和锌液面产生锌灰[17-18]，防止锌粒、条锌等质量缺陷产生。根据产线实际情况而定，炉鼻子露点通常控制在−30～−10 ℃。

排渣系统可把锌液面锌灰通过溢流方式排到收集槽内，保持炉鼻子内带钢附近锌液面清洁，杜绝锌灰、锌渣缺陷。排渣效果的关键是做好锌液液位差精度控制[19]，提升锌渣溢流效应并防止波纹板结渣。

2.3　镀液成分、镀液温度及带钢入锅温度

攀钢中铝锌铝镁镀层采用Al质量分数11%，Mg质量分数3%，其余为Zn元素和微量Si和RE等元素的合金配方，具有优良的耐蚀性、切口保证性和涂装性。同时镀层晶粒细、硬度高，提高了镀层耐磨性和润滑性，使钢板具有良好的加工成型性能。

镀液温度是热浸镀关键工艺，镀液温度高，有利于锌液流动，但容易增加炉鼻子内锌蒸气分压，产生锌灰、漏镀等缺陷，同时还会使锌锅内带钢铁损增加[19]，产生锌渣缺陷。锌锅温度过低，镀液表层在气刀处会出现局部凝固，降低镀液流动性[6]，导致锌流纹、横纹等缺陷产生。为解决上述问题，镀液控制温度需比合金完全熔化温度高40～50 ℃，具体到本镀液控制在460 ℃左右。

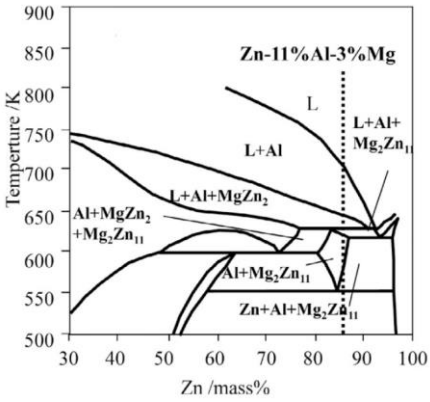
适当提高带钢入锌锅温度有利于促进Al-Fe中间层形成，还有利于保证镀液温度和进入气刀时的流动性[19]，从而提高镀层的附着性、加工性和产品实物质量，减少锌锅能耗，节约成本。因此，带钢入锌锅温度需比镀液温度高10～30 ℃。

2.4　气刀工艺

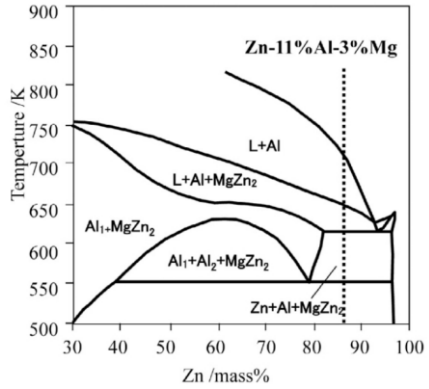
气刀控制对镀层重量、均匀性和表面质量起重要作用。由于镀液中Mg元素极易氧化造成镀液流动性变差产生质量问题，锌铝镁生产中气刀需要采用N_2气源吹扫[20]。即使采用N_2吹扫，仍会卷入周围的空气氧化镀液，同时喷吹气体会冷却镀液，从而提高镀液粘度，降低流动性，导致锌流纹、横纹等缺陷产生。为提高镀液流动性，生产时需要采用N_2吹扫、降低气刀压力、提高机组速度等措施，提升镀液流动性和产品实物质量。

2.5　镀后冷却工艺

Yamada等通过热力学软件ThermoCalc计算分析了Zn-11%Al-3%Mg 凝固过程中析出相，结果表明，$MgZn_2$在液相中的成核势能较小，在过冷条件下可以快速成核。因此，过冷条件下的非平衡转变得到的三相组织为Al+Zn+$MgZn_2$[21] (见图1)，而平衡相图转变最终得到Al+Zn+Mg_2Zn_{11}三相组织。因此，当镀层快速冷却时，对性能和表面质量有害的Mg_2Zn_{11}被抑制[22]，$MgZn_2$体积分数增加，有利于提升镀层质量和耐蚀性。



(a) 平衡状态



(b) 亚稳状态

图 1　Mg 固定在 3%时的 Zn-Al-Mg 三元体系相图[21]

Fig.1　Phase diagram of the Zn-Al-Mg ternary system with Mg fixed at 3%[21]

WINT等[23]通过试验研究了不同镀后冷却速度条件下Zn-2.7%Al-1.5%Mg的镀层组织及电化学腐蚀性能。结果表明，提高镀后冷却速率，可充分细化相组织，提升镀层耐蚀性。

通过研究，家电用Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板生产时需将高跨带钢温度控制在240 ℃以下，并分段控制冷却速率，从而达到优化镀层组织，减小晶粒，提升镀层性能和防止黑点等缺陷的目的。

2.6　辊涂工艺

Zn-11%Al-3%Mg镀层中的Mg元素易发生氧化反应导致镀层变黑，影响美观性。辊涂工艺的作用是在镀层表面涂上有机涂层并固化成致密网状结构的复合膜层，起到隔离氧化介质[24]，预防镀层变黑作用。涂层本身致密度和孔隙率对镀层变黑速度有较大影响，采用高致密有机涂层、提高膜厚或双涂层等方法可有效改善变黑情况。同时，提高固化温度和采用近红外+热风烘干等复合固化方式有利于形成致密涂层结构，从而减少镀层氧化黑变，提升产品实物质量。

3　典型缺陷治理

3.1　锌流纹

锌流纹缺陷是气刀吹扫过程中镀液在带钢表面凝固时形成的具有一定波浪形貌的表面外观[25]，其本质是镀层厚度不均匀，见图2。锌流纹的影响因素主要有在镀液流动性、带钢抖动、气刀冷却及吹扫工艺。因素Mg元素非常活跃，在气刀区域会产生严重氧化。镀液表面被MgO层覆盖，降低了流动性，从而在镀层表面产生锌流纹缺陷[15]。针对锌流纹缺陷，通常采用N_2气刀，适当提高带钢入锌锅温度和镀液温度，降低气刀压力等措施，减轻镀液在气刀区域氧化和冷却，保证镀液流动性，从而消除锌流纹缺陷。

图 2　锌流纹缺陷

Fig.2　Defects of zinc flow lines

3.2　黑点

黑点缺陷是镀层表面肉眼可见的圆形绿豆大小的黑色斑点，与正常区域轮廓明显，见图3。分析显微组织，黑点部位是细小的颗粒状Zn/Al/$MgZn_2$三元组织，而正常位置枝晶间由大量的层片状Zn/$MgZn_2$二元共晶及少量Zn/Al/$MgZn_2$三元共晶组成，从而造成宏观上肉眼可见的黑点缺陷[16]。黑点缺陷形成的原因是镀后凝固过程中冷却速率不均匀。若镀后冷却速率过高，析出初生Al枝晶后，剩余液相被快速冷却至三元共晶反应温度以下，从而形成了细小的三元共晶组织。通过分段控制镀后冷却速率，让镀层冷凝依次析出初生Al枝晶、二元共晶组织和三元共晶组织，可消除黑点缺陷。

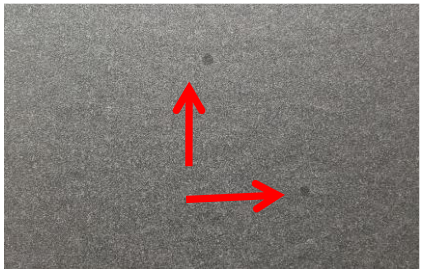


图 3　黑点缺陷

Fig.3　Defects of black spots

3.3　镀层斜纹

镀层斜纹特征从带钢边部向中心出现向下倾斜延伸的发亮的线条，边部发亮最严重，从边部向中心逐渐减轻消失，部分线条粗线伴有垂直方向疤坑，见图4。斜纹产生机理是因锌铝镁镀液中Mg元素氧化在带钢表面形成氧化膜，带钢出锌锅后氧化膜在流动时产生发亮裂纹，同时由于带钢中部温度比边部下降慢，中部镀液流动性好于边部，从而产生边部到中部向下的镀层斜纹缺陷[15]。镀层斜纹多发生于厚规格和厚镀层产品，可通过提高机组速度和镀层均匀性、降低带钢入锌锅温度和镀后冷却速度改善。

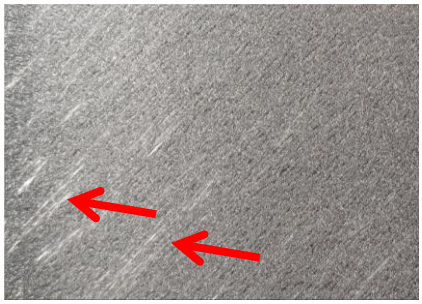


图 4　镀层斜纹缺陷

Fig.4　Diagonalt defects on coating

3.4　锌粒和条锌

锌粒、条锌实质是锌渣粘附于带钢表面形成的凸起点或线状痕迹，见图5，是家电用镀层钢板生产中的典型顽固缺陷。锌渣来源主要有：炉鼻子内锌灰、面渣，镀液表面Zn、Mg、Al的氧化面渣，镀液中Zn、Fe化合物形成的游离渣[19]。锌渣产生的影响因素有炉鼻子泄漏、气刀吹扫角度和压力、镀液温度、带钢入锌锅温度、镀液成分波动等因素。其解

图 5　锌粒及条锌缺陷

Fig.5　Defects of zinc particles and zinc streaks

决措施主要有稳定机组速度、镀液温度、带钢入锌锅温度、镀液成分等工艺。同时，解决炉鼻子泄漏、炉鼻子保护气体加湿和采用炉鼻子排渣泵对锌粒、条锌改进具有重要作用。

4　攀钢中铝型锌铝镁产品开发实绩

4.1　产品表面质量

攀钢热镀锌铝镁机组于2025年开始家电用Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板试制。通过对关键工艺技术的研究和优化，消除了锌流纹、黑点、镀层斜纹、锌粒、条锌等顽固质量缺陷，产品实物质量迅速改善，见图6。现产品已通过知名家电企业空调零部件测试并正式批量供货。攀钢在开发期间共生产1.8万余吨中铝锌铝镁镀层产品，I组品率达到95%，成材率96.8%，技术指标达到成熟产品的水平，顺利拓展了攀钢家电用镀层钢板品种。

图 6　改进后产品表面质量

Fig.6　Improved surface quality of the product

4.2　产品力学性能

攀钢中铝型锌铝镁产品目前主要开发了DX51D～DX53D牌号。力学性能如表2、表3和表4。

表 2　DX51D 力学性能

Tab.2　Mechanical properties of DX51D

项目	抗拉强度/MPa	伸长率/%
标准要求	270～500	≥22
性能范围	303～418	28.5～39.5
平均值	372	34.6
合格率/%	100	100

表 3　DX52D 力学性能

Tab.3　Mechanical properties of DX52D

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
标准要求	140～300	270～420	≥30
性能范围	178～296	305～406	33.0～42.5
平均值	238	349	37.4
合格率/%	100	100	100

表 4　DX53D 力学性能

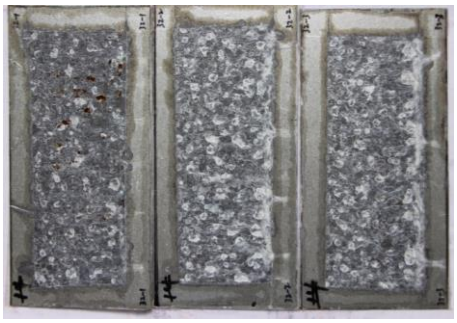
Tab.4　Mechanical Properties of DX53D

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	*N* 值	*R* 值
标准要求	140～260	270～380	≥34	≥0.17	≥1.4
性能范围	165～187	301～340	41～44	0.21～0.23	2.25～2.75
均值	175	313	41.8	0.223	2.46
合格率/%	100	100	100	100	100

结果表明，攀钢锌铝镁产品力学性能达到标准范围，具有较好的冲压成型性能，满足家电用户制造加工需求。

4.3　中性盐雾耐蚀性能

图7所示的为普通镀锌产品和锌铝镁产品(均无表面处理)中性盐雾对比实验。由图可见，100 g/m^{2}镀层的热镀锌钢板在144 h出现红锈，68 g/m^{2}镀层的锌铝镁钢板经过1 728 h出现红锈。经加权计算，锌铝镁镀层钢板中性盐雾耐腐蚀性是镀锌板的15倍以上。结果表明攀钢开发的Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板具有优良的耐腐蚀性能。



(a) 热镀锌(100 g/m^2, NSST/144 h)

(b) Zn-11%Al-3%Mg 镀层(68 g/m^2, NSST/1 728 h)

图 7　热镀锌和 Zn-11%Al-3%Mg 镀层中性盐雾试验对比

Fig.7　Comparison of neutral salt spray test between hot-dip galvanizing and Zn-11% Al-3% Mg coating

4.4 涂装性能

攀钢开发的Zn-11%Al-3%Mg镀层产品在国内众多知名家电厂进行了涂装测试，结果表明，涂层划格试验达到GB/T 9286中0级水平，涂装性能良好。同时，攀钢锌铝镁还在彩涂线上进行了批量工业试验，彩涂产品的T弯、冲击等性能合格率100%，质量和性能稳定。

5 结 论

(1) 通过合理控制清洗工艺、带钢入锌锅温度、锌锅工艺、气刀等工艺，攀钢成功开发出家电用Zn-11%Al-3%Mg锌铝镁镀层产品，并在家电制造和彩涂中得到成功应用。

(2) 中性盐雾对比实验结果表明，攀钢生产的Zn-11%Al-3%Mg镀层产品耐腐蚀性能远高于普通热镀锌产品，对家电用镀层钢板材料升级具有重要意义。

(3) Zn-11%Al-3%Mg镀层钢板生产的难点在于表面易产生锌流纹、黑点、镀层斜纹、锌粒和条锌等缺陷，通过提高清洗效率、优化带钢入锌锅温度和锌锅温度、减少气刀对镀液的氧化和冷却，有利于提升产品表面。

参考文献

[1] 谷美玲, 刘昕. 连续板带热镀锌及锌合金镀层的特点与展望[J]. 材料保护, 2019, 52(9): 176-179.

[2] 马常帅, 冉长荣, 郭太雄, 等. 国内外锌铝镁镀层钢板的研究现状及未来市场前景[J]. 广州化工, 2024, 52(4): 35-38.

[3] 金永清, 郭太雄, 董学强, 等. Mg 含量对 1.6%Al 锌铝镁合金镀层组织影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 191-196.

[4] 李涛, 柳伟, 邵琛琛, 等. Zn^{2+}掺杂硫化物/氢氧化物异质结构的性能[J]. 电池, 2024, 54(3): 297-302.

[5] 姚良少. 强力磁铁在碱性锌锰电池生产线上的应用[J]. 电池, 2024, 54(2): 227-229.

[6] 杜昕, 张满仓, 段生朝, 等. 高耐蚀锌铝镁镀层研究现状[J]. 工程科学学报, 2019, 41(7): 847-856.

[7] 谢英秀, 金鑫焱, 王利. 热浸镀锌铝镁镀层开发及应用进展[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(3): 167-174.

[8] 李科学, 李岩杰, 苏金波, 等. 镀锌家电板流纹缺陷产生原因及改进[J]. 河北冶金, 2017(5): 33-36.

[9] 亢业峰. 家电用微碳热镀锌钢板开发与生产实践[J]. 金属世界, 2020(4): 78-80.

[10] 刘广会, 韩赟, 刘全利, 等. 锌铝镁镀层在加热过程中的组织和耐蚀性[J]. 钢铁, 2024, 59(7): 139-149.

[11] 金永清, 郭太雄, 董学强, 等. Mg 含量对 1. 6%Al 锌铝镁合金镀层组织影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 191-196.

[12] 董世文, 骆永伟, 王向飞, 等. 锌铝镁镀层板的形貌分析[J]. 材料保护, 2020, 53(12): 146-151.

[13] 李智丽, 杨小明, 罗新龙, 等. 锌铝镁镀层表面黑点耐蚀性能的试验研究[J]. 包钢科技, 2023, 49(2): 1-4.

[14] 王松, 张志远, 冯康杰, 等. 锌铝镁镀层锌流纹的形成原因与控制[J]. 热处理, 2024, 39(6): 52-55.

[15] 魏升辉, 梅淑文, 高小尧, 等. 锌铝镁产品表面缺陷分析与控制[J]. 山西冶金, 2023, 46(5): 135-138.

[16] 彭俊, 金鑫焱, 钱洪卫. 热浸镀 Zn-11Al-3Mg 镀层黑点缺陷形成机理研究[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 208-216.

[17] 安伊宁. 热镀锌机组锌灰产生机理及控制技术研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(10): 170.

[18] 翟立刚. 冷轧热镀锌带钢表面锌灰缺陷形成原因分析及控制[J]. 科技资讯, 2015, 13(9): 99.

[19] 金永清, 尹红国, 寸海红, 等. 热镀锌镀层白条缺陷研究及控制[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(4): 106-110.

[20] 金永清, 尹红国. 低铝型热镀锌铝镁镀层钢板生产技术探索[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 227-230.

[21] Honda K, Yamada W, Ushioda K. Solidification structure of the coating layer on hot-dip Zn-11%Al-3%Mg-0.2%Si-coated steel sheet[J]. Materials Transactions, 2008, 49(6): 1395-1400.

[22] 张永. Zn-Al-Mg 合金的熔炼及其腐蚀机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[23] WINT N, COOZE N, SEARLE J R, et al. The effect of microstructural refinement on the localized corrosion of model Zn-Al-Mg alloy coatings on steel[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(11): C3147-C3158.

[24] 张子聪. 锌铝镁合金镀层无铬钝化工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.

[25] 孟晓涛, 常志禄, 冀志宏. 无锌花热镀锌带钢锌流纹缺陷分析及改进[J]. 河南冶金, 2018, 26(3): 27-28.