

5系高镁铝合金清洗工艺优化与水印缺陷控制研究

张胜杰 韩德地 张天磊 牛志远 马建科
河南中孚高精铝材有限公司 河南 巩义 451200

摘要: 5系高镁铝合金因其优异的综合性能,在精密电子制造领域占据重要地位。清洗作为铝卷材精整生产的关键环节,直接影响其表面质量与后续加工性能。针对高镁铝合金精整清洗后易出现的水印缺陷,本文从材料特性与工艺条件两个维度揭示了其形成机理:镁含量高导致的强亲水性、退火生成的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 复合氧化膜毛细吸附作用,以及杂质元素偏析引发的微区电化学腐蚀。通过四阶段递进实验,系统优化了清洗工艺:“仅稳定化退火前清洗,稳定化退火后不再清洗”,开发了脱脂助剂与脱脂剂的混合清洗体系,并将游离碱A值稳定控制在10~12ml。优化后的工艺显著抑制了水印的产生,表面清洁度满足高端电子行业标准。

关键词: 高镁铝合金;精整;清洗;游离碱A值;水印缺陷

引言

5系高镁铝合金材料因其优异的综合性能——包括高强度重量比、卓越的耐腐蚀性、优良的导热导电特性以及无磁性等特点,已成为高端3C电子产品、工业控制设备等领域电子安装面板的首选材料。在铝卷精整生产过程中,合金表面易附着铝粉、轧制油、金属碎屑、氧化皮,若未彻底清除,会导致后续生产出现问题。但传统去离子水清洗已无法满足精密电子对清洁度的高要求,需配合适当清洗剂。同时,铝材轧制过程中易产生波浪变形,波浪处带油量多,完全再结晶退火时若油未彻底挥发,易形成黄油斑,故退火前需进行清洗。因此,高镁合金在成品轧制后可进行两次精整清洗^[1]。然而,高镁铝合金因镁元素偏析形成微观原电池,对水极为敏感,清洗干燥过程中易发生局部腐蚀与盐分沉积,形成不规则水渍、色差斑点等水印缺陷。在实际生产中,该缺陷曾导致电子面板类产品客户投诉并退货,严重影响生产效率与企业品牌竞争力。近年来,国内外学者在铝合金表面清洗与缺陷控制领域开展了一系列研究:新型复配脱脂剂在去除铝板带表面油污方面的有效性、5083铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究。然而,上述研究聚焦于通用型铝合金清洗剂的改进或特定后处理前的表面准备,针对高镁铝合金薄板料在精整拉矫线连续生产过程中因退火前后清洗而产生的水印缺陷,尚缺乏系统性的机理解析与工艺闭环控制策略。因此,深入研究高镁铝合金卷材在精整拉矫清洗时水印形成机制并开发稳定化控制措施,对提升产品质量、降低生产成本具有重要的工程实践意义。本研究的创新性在于:提出工序重构结合混合清洗剂的协同控制策略,通过机理-工艺闭环验证,解决了高镁铝合金薄板带材在精整拉矫清洗时容易

产生水印缺陷的行业痛点。

1 水印形成机制解析

水印缺陷是高镁铝合金材料固有特性与清洗工艺参数失配共同作用的结果,其形成是一个涉及表面物理、界面化学与电化学的复杂过程。

1.1 材料固有特性

1.1.1 高镁特性的基础表面影响

高镁使铝合金表面自由能升高,且表面富镁层及镁的氧化产物羟基密度更高,显著提升表面亲水性,清洗后水分难以收缩成水珠滚落,而是在表面铺展形成薄水膜。水膜蒸发过程中,其中的清洗液残留、钙镁离子等溶解物会沉积在表面,最终形成水印。

1.1.2 镁偏析机理

镁在铝基体中为表面活性元素。退火过程中,镁原子沿晶界扩散并向自由表面偏析富集。研究表明,高镁($>3\text{wt}\%$)5xxx系铝合金在中等高温下晶界处会析出电化学活性的富镁 β 相^[2]。温度越高、镁含量越高,偏析速率越快,最终形成连续的镁富集层,为后续氧化反应及水印形成奠定基础。

1.1.3 退火氧化膜的特性及影响

(1) 退火氧化膜的疏松化与增厚

铝合金均匀化退火后,表面会生成疏松的Al-Mg混合氧化膜,其中Mg含量异常偏高,且存在大量微孔。该类混合氧化膜孔隙率大、亲水性更强;同时MgO与水分子的结合力远高于纯 Al_2O_3 ,进一步促使清洗后水分附着在表面形成薄水膜。

(2) 氧化膜的特殊结构

高镁含量破坏了铝氧化膜的连续生长机制。当Mg含量超过3wt%时,氧化过程中Mg的氧化电位低于Al,优先

氧化生成 MgO ，阻碍了 Al_2O_3 连续致密层的形成。 MgAl 合金在水中形成的氧化膜具有三层结构：内层为水合层，中间为致密层，顶层则为片状形貌。这种多层非均质结构使得 MgO 无法完全覆盖基体表面，形成大量孔隙。

1.1.4 水印形成核心机制

清水喷淋时，水分易渗入退火氧化膜的孔隙中，风刀仅能吹除表面游离水，而孔隙内的水分因毛细吸附作用难以被完全去除。这些水分蒸发后，其中的溶质（如 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgCO_3 等）会沉积在表面，形成干涸的沉积层，最终导致水印缺陷。

1.1.5 水印形成的加剧效应

（1）氧化膜层与污染物的加剧作用

退火生成的 Al_2O_3 - MgO 混合氧化膜无致密 Al_2O_3 底层，孔隙内残留水分成为水印的持续“源头”；同时，退火后活化的表面更易吸附空气中的粉尘等污染物，会加剧水印的显现程度。

（2）杂质影响

高镁合金中微量的铜、铁等杂质元素，在退火过程中可能偏析到表面，形成微小的电化学活性位点。这些位点会增强表面对水中离子的吸附能力，使清洗后离子残留量增加，进一步加剧水印形成。

1.2 工艺诱发因素

1.2.1 喷嘴问题

清洗液在喷淋期间，水箱的淤泥往往会随泵的循环系统流动而堵塞喷孔或降低喷射压力，影响清洗效果，导致局部清洗不充分与局部水膜过厚并存，使得铝材表面接收的清洗水呈现区域性差异，经挤干辊挤干后，带

材表面水分残留厚度不均，且伴随清洗液残留，烘干后溶质沉积加剧，水印缺陷更为明显^[3]。

1.2.2 挤干辊问题

挤干辊磨削圆度不佳，或长期使用后出现辊面磨损、粘胶、硬度不均及平行度偏差等问题，会导致辊面与铝材表面的线压力分布不均，沿带材宽度方向存在压力波动，最终形成沿带材长度方向的连续条纹状水印。同时低压力区域不仅残留水分，还残留未被挤除的清洗液，烘干后溶质沉积更集中，条纹对比度更高。

2 试验材料

基于对水印形成机理的深入理解，同时结合拉矫生产线主流的化学清洗工艺，进行了四个阶段的测试。试验材料选用5系高镁铝合金冷轧卷，厚度规格为0.2~0.5mm。试验依托于拉伸弯曲矫直生产线，主要设备包含喷淋清洗系统、挤干辊及烘干装置、矫直单元。采用滴定法测定清洗液游离碱（A值），单位为ml。通过无纺布在线擦拭1min，结合下游客户压板式分切时无纺布观察表面铝粉残留，按残留面积占比将清洁度分为轻度、中度、重度铝粉残留。水印缺陷通过拉矫生产线间断性在线检测与下游客户人工实时在线检测进行判定。

3 试验与工艺优化

3.1 第一阶段：脱脂助剂效果评估

初始工艺为稳定化退火前后均进行水洗，退火后添加中性脱脂助剂清洗，测试15吨。试验前对产线喷嘴及挤干辊进行了常规维护。试验结果显示，生产过程稳定性极差，每卷生产均需反复调整参数。重度铝粉残留，水印缺陷发生率达33.5%，水印程度重（图1）。



图1 水印缺陷及重度铝粉残留的表面状态图

3.2 第二阶段：脱脂剂效果评估

鉴于中性脱脂助剂清洗能力有限，在保持其他参数不变的前提下，将清洗介质更换为清洗能力更强的碱性脱脂剂，测试45吨。碱性脱脂剂含有高效的低泡表面活性

剂，可快速去除铝卷材表面的油污^[4]。中度铝粉残留，水印缺陷发生率由33.5%下降至22.6%，表面水印轻微。

3.3 第三阶段：清洗工序重构效果评估

基于水分易渗入退火氧化膜孔隙中的机理分析，本

阶段进行了颠覆性的工序重构：将清洗工序完全调整至稳定化退火之前进行，退火后仅进行矫直与切边，不再接触任何水性介质。前期测试中脱脂剂的游离碱A值控制在15~20ml，共测试50吨。工序重构后效果显著：轻度铝粉残留，水印缺陷发生率由22.6%下降至0%。但在连续生产中暴露出三个新问题：一是部分带材表面出现“过洗发白”现象；二是清洗水箱内泡沫泛滥，有污染带材表面风险，溶液更换周期缩短至10卷/次，严重影响生产效率与成本；三是矫直试生产阶段，带材表面出现孤立斑点状水滴印缺陷。水滴印问题经排查发现，该缺陷是清洗箱顶盖及上喷射梁表面冷凝水聚集滴落所致。为此采取了针对性措施：生产前掀开喷淋箱顶盖并抽出上喷射梁，通过自然风干控水，消除冷凝水源。

3.4 第四阶段：混合清洗剂与参数优化效果评估

“过洗发白”源于过高的游离碱浓度对铝基体表面的微刻蚀，导致表面粗糙度增大，光散射增强。本阶段对

清洗介质进行了复配开发与参数优化。将脱脂助剂（中性）与脱脂剂（碱性）混合添加，并将游离碱A值精确控制在10~12ml的低区间内，共测试50吨。该优化方案取得了理想效果：轻度铝粉残留，水印缺陷发生率0%，完全满足高端电子行业标准。“过洗发白”现象彻底根除，且泡沫产生量大幅减少，水箱溶液的更换周期由原来的每10卷延长至每20~25卷，水滴印不再产生。结果表明，降低游离碱A值含量减少了过度碱性的负面影响，同时保留了足够的碱性以皂化油脂；中性脱脂助剂含有润湿、分散等功能成分，能改善清洗液的渗透性和悬浮污染物的能力，脱脂剂提供必要的碱性去污成分。两者混合后，在去污力和泡沫控制间取得平衡。

4 最终工艺与效果验证

通过系统实验和数据分析，最终确定了高镁铝合金最优清洗工艺的核心参数，如下表所示：

表1 高镁铝合金最优清洗工艺的核心参数

工艺要素	前期工艺	最终工艺	关键改进效果
清洗流程	稳定化退火前清洗+退火后清洗	仅稳定化退火前清洗	避免退火后表面活化导致水印
清洗介质	中性脱脂助剂/脱脂剂	混合清洗剂（助剂:脱脂剂 = 3:2）	平衡去污力与泡沫控制，延长换液周期
游离碱A值	15~20ml	10~12ml	抑制“过洗发白”
设备维护	基础清洗与喷嘴清理	增加换水周期与控水操作	减少冷凝引发的水滴印

在后续4个月的批量生产中（累计约1000吨），水印缺陷投诉率为零，换液周期稳定在每20~25卷一次，未再出现因清洗问题导致的客户退货。这一结果支持了“退火后不清洗”加“混合清洗剂”组合策略的有效性。

5 结语

本文系统揭示了5系高镁铝合金精整清洗后水印缺陷的形成机制：高镁含量导致表面强亲水性，退火生成的疏松 Al_2O_3 - MgO 复合氧化膜易吸附水分，加之清洗参数不当，造成水分残留与溶质沉积，形成水印。通过四阶段实验，优化出“仅在稳定化退火前清洗”的工艺路线，规避退火后表面活化带来的水敏风险；并采用脱脂助剂与脱脂剂复配体系，将游离碱A值控制在10~12ml。实施后水印显著减少，表面清洁度达高端电子标准，同时解决“过洗发白”问题，水箱换液周期由10卷/次延至20~25

卷/次，清洗剂与废水处理成本降低约15%，生产效率提升10%。该工艺经大规模验证，稳定性好，不仅为高镁铝合金提供高效清洗方案，还可推广至其他高活性铝合金，具广泛工程应用价值。

参考文献

[1]左欣欣,王晓磊,朱源源,等.5052铝合金阳极氧化料基材边部"发白"分析及对策[J].铝加工,2023,(06):53-56.
[2]严卫才,王帅,刘昌明,等.新型铝合金脱脂剂工艺试验探究[J].有色金属加工,2021,50(03):56-58.
[3]王蔚,纪向城,刘伟军,等.5083铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究[J].中国激光,2023,50(04):181-196.
[4]高聪敏,常瑜.铝合金板带表面清洗工艺研究及应用[J].重型机械,2024,(06):45-48.