

镀锌钢板漏镀缺陷原因分析和改善措施

张羽佳，赵浩然

唐山钢铁集团高强汽车板有限公司，河北 唐山 063000

DOI: 10.61369/SSSD.2025080003

摘要：漏镀是镀锌钢板的重要缺陷，它影响钢板的抗腐蚀性能，也影响钢铁企业的经济效益，因此分析漏镀产生的原因，寻找漏镀缺陷的改善措施，是一件重要的事情。

关键词：镀锌钢板；漏镀缺陷；原因分析；改善措施；预处理工艺

Analysis of Causes and Improvement Measures for Missed Plating Defects in Galvanized Steel Sheets

Zhang Yujia, Zhao Haoran

Tangshan Iron and Steel Group High-Strength Automobile Sheet Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000

Abstract : Missed plating is a significant defect in galvanized steel sheets, which affects the corrosion resistance of the sheets and the economic benefits of iron and steel enterprises. Therefore, analyzing the causes of missed plating and finding improvement measures for such defects is an important task.

Keywords : galvanized steel sheets; missed plating defects; cause analysis; improvement measures; pretreatment process

前言

随着钢铁工业的不断发现，冷轧的重要性也在不断提升，镀锌作为重要工艺也在不断发展而它产生的缺陷越来越得到重视，而漏镀则是镀锌一项重要的缺陷，漏镀是指电镀或镀层工艺中，工件表面局部未形成镀层的缺陷，常见于电镀、热镀锌、涂镀等工艺中，而这篇文章主要讨论的是热镀锌中的漏镀缺陷。

一、原因分析

想要分析漏镀是如何产生的我们应该先说一下热镀锌的原理，热镀锌形成的锌层叫做热浸锌层，热浸锌层是锌在液态下，分三个步骤形成的，首先铁基表面被锌液溶解形成锌、铁合金相层；然后合金层中的锌离子进一步向基体扩散形成锌、铁互溶层；最后合金层表面包裹着锌层，锌层覆盖在钢铁紧固件表面上，它可以避免钢铁基体与任何腐蚀溶液的接触，保护钢铁紧固件基体免受腐蚀。在一般大气中，锌层表面形成一层很薄而密实的氧化锌层表面。它很难溶于水，故对钢铁紧固件基体起着一定保护作用。如果氧化锌与大气中其它成分生成不溶性锌盐后，则防腐蚀作用更理想；具有锌—铁合金，结合致密，在海洋性盐雾大气及工业性大气中表现特有抗腐蚀性；由于结合牢固，锌—铁互溶，具有很强的耐磨性；由于锌具有良好的延展性，其合金层与钢铁基体附着牢固，因此热镀锌可进行冷冲、轧制、拉丝、弯曲等各种成型工序，不损伤镀层；热镀锌后，相当于一次退火处理，能有效改善钢铁基体的机械性能，消除钢件成型焊接时的应力，有利于对钢结构件进行车削加工。但是没有完美的工艺，它

一定会伴随着缺陷出现，而漏镀则是一个重要的缺陷。

我们还要分析一下为什么用锌当防腐层，这个也涉及到化学上一个很重要的知识，叫做金属活动性顺序表，因为锌比铁活跃，因此在与空气发生氧化反应，与水发生电化学腐蚀时，锌可以与空气和水优先反应，可以保护铁基体不受腐蚀。因为发生电化学腐蚀时，可以理解为发生了金属失去电子的氧化还原反应，而锌与铁之间因为电化学形成的了微小的原电池，原电池原理是牺牲负极保护正极，发生电化学腐蚀时，锌由于比铁更容易失去电子，理所当然的成为了被牺牲的负极，来保护成为正极的铁基体不被腐蚀，所以说如果漏镀，那么微小的原电池无法形成，铁基体直接与空气和水反应发生电化学腐蚀失去电子，进而影响钢铁的整体性能。

(一) 漏镀的危害

漏镀具有很多危害，首先是耐腐蚀性下降，因为漏镀区域失去金属镀层保护，易引发锈蚀问题，尤其在潮湿环境或化学介质接触时加速腐蚀。^[1] 漏镀还有外观缺陷。

缺陷呈现为条状、块状或点状凹坑，导致表面不光滑，影响产品美观度，不符合高表面质量要求。漏镀还会引发生产损失缺

陷产品需返工或报废，增加生产成本；严重时可能导致整批产品不合格，造成经济损失。

（二）漏镀产生的原因

漏镀产生的原因有很多，包括存在氧化铁皮或者其他氧化物，除油不彻底，表面腐蚀或者划痕，温度不达标等^[2]。

如果存在氧化铁或者其他氧化物，锌无法与氧化铁结合，这个涉及到了金属的微观结构镀锌产生的铁锌合金层，是基于一种叫金属键的化学键是化学键的一种，主要在金属中存在。由自由电子及排列成晶格状的金属离子之间的静电吸引力组合而成。镀锌产生的铁锌合金相层，锌铁互溶层都依赖于金属键。^[3] 氧化铁的化学键是以离子键为主导的化学键，它无法和金属锌形成锌铁合金层，所以说氧化物是漏镀产生的原因之一。事实上钢板从热轧成型之后都会存在一定厚度的氧化铁皮，热轧钢板颜色也相对较重，所以说在镀锌之前还会有一道叫做酸洗的工序，酸洗是通过盐酸与氧化铁发生反应，将氧化铁皮去除，酸洗的化学方程式为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} = 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ 。

但是化学反应不是完美反应，在现实中氧化铁皮的厚度不均匀，会出现酸洗不足的情况，也就是说钢板表面会有氧化铁或者其他氧化物，这些氧化物无法与锌产生铁锌合金相层，导致漏镀的发生^[4]。

除油不彻底也是漏镀产生的一个重要原因钢板经过酸洗之后会进入轧机之中，众多周知轧机堪称钢厂的油污大王，轧机需要大量的润滑油保证机器的运转，因此钢板通过轧机免不了有油污残留，因此在退火之前，有一道除油的工序，除油本质上是皂化反应，通过碱液与油污中的油脂发生化学反应，达到除油的目的。皂化反应的化学方程式为 $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_3\text{C}_3\text{H}_5 + 3\text{NaOH} \rightarrow 3\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COONa} + \text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$

但是温度不够和碱液浓度不够会导致皂化反应不完全使得除油不彻底。

油污不与金属发生反应而且它会阻隔铁和锌液的接触，从而产生漏镀。

表面腐蚀

表面腐蚀主要是酸洗过量导致的，众所知之酸洗时氧化铁皮的厚度是不均匀的有的地方会出现氧化铁皮残留，有的地方就会出现酸洗过量的情况，盐酸与金属铁发生反应进而导致表面腐蚀。盐酸与铁反应化学方程式为存在过酸洗缺陷的带钢，其表面粗糙度大于酸洗质量正常的带钢，其在轧制过程中产生的铁屑量大大增加，从而影响到乳化液系统的清洁性和轧后带钢表面残留物的多少，这些残留物会阻隔铁与锌液的接触从而产生漏镀。另外过酸洗会使钢基体吸氢，镀锌时氢气受热膨胀逸出，导致镀层出现漏镀^[5]。

退火不彻底

镀锌退火炉作为生产线的心脏，直接影响漏镀问题发生概率。炉内气氛控制是关键——氢气比例过高会加剧钢带氧化层未脱净，残留杂质在浸镀时造成镀液附着力不足。建议保持氢气含量40%到55%之间可有效规避此类状况。实际案例数据显示，某企业炉内氢含量调整至52%的半年内，生产线漏镀投诉率降低

49%^[6]。操作环节中最容易出现疏漏的位置在炉鼻子段区，负压值需控制在恒定范围，偏差超过1.2%就会引发氧元素渗入造成板面氧化物淤积。预热段温度梯度必须精确——上下层温差8℃是个危险临界点，超过会导致钢带走带抖动加剧裸板暴露风险。建议设定炉壁上下温区温差控制在3℃以内。有个细节容易被工人忽视：当钢带连续变更为小规格厚度时（如1.2mm改0.5mm），退火时长必须缩短12%至15%，避免过烧产生晶粒异常增生，这些凹凸体在镀锅拉扯中逐渐破损形成针孔型漏镀^[7]。

二、改善措施

针对酸洗不足引起氧化铁残留或者酸洗过量引起的表面腐蚀，要做出改善可以采取柔性酸洗的措施柔性酸洗常用于处理发电机空芯铜导线等精密金属部件的氧化问题，通过调节酸洗液的配方和pH值，实现选择性溶解无钝化作用的氧化物（如CuO），保留具有钝化作用的氧化物（如Cu₂O），从而减少对基材的损伤。所以柔性酸洗也可以减少酸洗不足和酸洗过量问题，以减少漏镀的发生，改善钢板的质量。事实上曼弗雷德·汉森也发明了用于经济地柔性酸洗和冷轧金属带的工作方法和设备，并申请了专利。所以说未来柔性酸洗也会是一个发展趋势^[8]。

针对皂化反应无法完全除油导致的漏镀问题，应该加强温度的控制，碱液浓度的控制，对通常控制在60–80°C之间，此温度区间能有效促进皂化反应和乳化反应^[9]。

我们还可以展望一下AI技术，AI也是未来的一个大方向，目前我们说一下AI在钢铁方面的应用通过大模型的学习和思考，可以将人工经验转化成一个稳定的操作标准，转炉炼钢的每一步大模型都能够提供相应的指导，大大解放了人工，更进一步提高了转炉炼钢的稳定性，解决了转炉炼钢命中率低等问题。首钢迁安的鱼雷罐将铁水从炼铁工序运到炼钢工序，以往运行时间需要40分钟以上，深度训练的‘鱼雷罐跟踪与铁水降温’人工智能大模型部署到管理系统中后，运行时间压缩到了15分钟以内，首钢迁安通过应用人工智能模型参与生产管控后，年节省成本7000万元，年减排二氧化碳4.02万吨。迁安鑫达钢铁公司转炉车间的转炉工过去需要戴着防护面罩、穿着厚重防烫服，在滚滚热浪中通过观察钢水状态，凭借经验来控制炉内的温度，添加合金、石灰等各种原料。只需坐在车间控制室的电脑前，在系统中选择炼钢所需的原材料种类、数量以及温度等生产参数，这些数据输入系统后，一套人工智能算法模型就会迅速启动。这个模型能够快速生成最佳的设备运行方案，然后自动控制各种炼钢设备，包括氧枪、原料添加装置、炉体倾动机构等的运行，确保钢水在最佳的条件下进行冶炼。据测算，目前迁安市的钢铁企业通过应用人工智能大模型，使得全市钢铁生产连续化程度提高12%，吨钢能耗降低8%，产品质量一致性提升20%。AI大模型也可以用在酸洗区域，可以把凭经验转为凭数据，减少过酸洗欠酸洗的发生，进而减少漏镀的发生。AI大模型也可以用在退火区域，改善退火质量，减少应力的集中，不仅可以减少漏镀的出现，还能节约煤气降低成本，无锡有台商投建的智慧管理系统，通过对退火段连续温度

与板温匹配的算法优化，将镀层牢度偏差控制在公差带前三分之二区域，这样的系统升级使得两年间从未发生批量漏镀事故。根据钢铁研究总院的攻关数据表明，将漏镀返修成本中的62% 投放于退火段智能化改造是最具性价比的长期方案^[10]。

三、结论

针对镀锌钢板的漏镀缺陷，发现原因是酸洗不足导致的氧化

铁残留，和酸洗过量引起的表面腐蚀，柔性酸洗技术可以改善酸洗效果，提升钢板表面质量，减少漏镀的发生。对于除油应该控制好温度和碱液浓度，也可以提升质量，减少漏镀的发生。AI 大模型目前在炼钢热轧领域有不少成效，我也希望它能在冷轧一些工序上能早日应用，进行系统升级减少漏镀缺陷，虽然前期需要投入很多资金，但长期来看确实降低成本提升效益。

参考文献

- [1] 车彦民, 朱涛, 章华明, 等.CSP 板卷及冷轧镀锌板表面缺陷分析 [J]. 钢铁, 2006, 41(2): 4.DOI:10.3321/j.issn:0449-749X.2006.02.016.
- [2] 江萍, 宋晓冬. 宝钢带钢连续热镀锌机组及汽车用镀锌板生产 [J]. 轧钢, 2000, 17(6): 5.DOI:10.3969/j.issn.1003-9996.2000.06.009.
- [3] 蒋光锐, 刘李斌, 刘华赛, 等. 热镀锌板镀层表面点状缺陷的分析方法 [C]// 全国轧钢生产技术会议 .2014.DOI:CNKI:SUN:ZZGG.0.2015-05-017.
- [4] 肖利. 热轧带钢酸洗热镀锌机组柔性化设计 [J]. 轻工科技, 2020(4): 6.DOI:CNKI:SUN:GXQG.0.2020-04-012.
- [5] 张宝宏, 丛文博, 杨萍. 金属电化学腐蚀与防护 [M]. 化学工业出版社 ,2005.
- [6] 牛绍蕊. 不锈钢的电化学腐蚀性能研究 [D]. 兰州理工大学 ,2010.DOI:10.7666/d.Y1712459.
- [7] 佩雷斯. 电化学与腐蚀科学 [M]. 化学工业出版社 ,2013.
- [8] 刘秀晨, 安成强. 金属腐蚀学 [M]. 国防工业出版社 ,2002.
- [9] 陶琦, 李芬芳, 邢健敏. 金属腐蚀及其防护措施的研究进展 [J]. 湖南有色金属, 2007, 23(2): 4.DOI:10.3969/j.issn.1003-5540.2007.02.014.
- [10] 张启富, 刘邦津, 仲海峰. 热镀锌技术的最新进展 [J]. 钢铁研究学报, 2002(04): 65-72.DOI:10.3321/j.issn:1001-0963.2002.04.015.