深冲汽车钢涂装适配性影响因素及控制工艺研究

勤 牧,袁晓鸣,刘 妍,刘恩泽,杨维宇,贾瑞雪

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要:针对深冲汽车钢涂装适配性问题,通过系统试验研究了前处理、磷化及电泳全流程的关键影响因素,揭示了基板表面粗糙度、峰值密度、防锈油处理方式、水洗工序 pH 值等关键参数对涂装性能的影响机制。研究结果表明,水洗工序 pH 值在 8.5 以上、合理的基材表面粗糙度(Ra≈1.2 μm)和峰值密度(RPc≥90 cm^{-1})协同作用、避免基板人工涂油处理是形成优质磷化膜、提升电泳漆膜耐腐蚀性能的核心。本研究为优化汽车钢板涂装适配性提供了具有普适性的工艺优化方向与质量控制要点。

关键词:深冲汽车钢;涂装适配性;磷化膜质量;耐腐蚀性能;表面粗糙度

中图分类号:TG174.4 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0035 - 05

Research on Influence Factors and Control Processes of Coating Compatibility for Deep Drawing Automobile Steel

Qin Mu, *Yuan Xiaoming*, *Liu Yan*, *Liu Enze*, *Yang Weiyu*, *Jia Ruixue*

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: The key influence factors of the entire process of pretreatment, phosphating and electrophoresis are studied through system experiments as well as the influencing mechanisms of such key parameters as surface roughness of plaque, peak density, processing modes of rust preventive oil and pH values of washing process on coating performances are revealed aiming at the coating compatibility issues of deep drawing automobile steel. The research results showed that pH value of washing process over 8.5, cooperating effects of reasonable surface roughness of plaque (Ra≈1.2 μm) and peak density (RPc≥90 cm^{-1}), avoiding manual oiling treatment of plaque are the core of forming high - quality phosphating film and improving corrosion resistance of electrophoretic coating film. This study provides universal process optimization directions and key points of quality control for optimizing the coating compatibility of automobile steel sheets.

Key words: deep drawing automobile steel; coating compatibility; quality of phosphating film; corrosion resistance; surface roughness

随着汽车工业对车身防腐性能要求的日益提高,汽车钢板的涂装适配性已成为衡量其综合质量的关键性能指标。在涂装生产中,汽车板需依次经历前处理、磷化(或者薄膜处理)、电泳等一系列工序[1],任何环节处理不当,均可能导致在严格的盐雾环境腐蚀后出现基材起泡、划线宽度超标等问题,从而影响其防腐性能的评价[2]。因此,系统研究影响涂装全流程中各关键参数对于保障涂装性能至关

收稿日期:2025 - 12 - 08

作者简介:勤 牧(1987 -),男,内蒙古包头市人,高级工程师,现从事板材应用技术研究工作。

重要。本文通过系统试验,深入研究不同基材状态及工艺参数,特别是前处理水洗工序、磷化膜质量与电泳漆膜质量对最终涂装性能的影响机制,旨在为汽车钢生产过程中提供具有普适性的工艺优化方向和质量控制要点。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

为全面评估各因素对涂装性能的影响,试验选用两种深冲汽车钢(分别标记为 A 和 B),并设计了差异化的表面处理,具体参数如表 1 所示,1#、2#试样的差异在于产线涂油后是否进行人工涂油,3#试样相较 1#、2#试样具有更高的表面粗糙度。所有试样在试验前均经严格筛选,确保表面无锈点、划痕及其他可见缺陷,样板经某车厂涂装生产线分别完成磷化、磷化 + 电泳处理后,制作成磷化板、磷化 + 电泳漆板若干片。

表 1 试样基本参数及处理状态

编号	牌号	厚度/mm	涂油类型	涂油量/(mg · m^{-2})	粗糙度 Ra/μm	峰值密度 RPc/(cm^{-1})
1#	A	0.7	产线涂油	1 200	0.90	93.8
2#	A	0.7	产线 + 人工涂油	>1 200	0.90	93.8
3#	B	1.0	产线涂油	1 200	1.27	90.3

1.2 试验方法

试验采用分阶段系统性评估方法,依次考察基板基础性能、磷化板质量和电泳漆板性能,以建立完整的涂装适配性评价体系。首先,模拟汽车涂装前处理工艺流程,重点研究水洗工序中 pH 值(8.0、9.0)和水质类型(纯水、自来水)对基板耐腐蚀性能的影响。通过记录不同条件下的生锈时间,评估基板在实际生产环境中的瞬时抗腐蚀能力。其次,综合采用湿热试验(100% RH,40 ℃,140 min)、5% NaCl 溶液浸泡试验(110 min),快速评价磷化板在严苛环境下的耐腐蚀性能。同时,通过膜重测量、SEM 形貌观察表征磷化膜的微观质量特征。最后,将电泳漆板进行 1 000 h 中性盐雾试验和 60 周期(4 h 盐雾、4 h 状态调节、16 h 湿热为 1 周期)交变盐雾试验,结合漆膜厚度、粗糙度和附着力测试,验证涂装样板的长期耐腐蚀性能。

2 试验结果与分析

2.1 前处理工艺对基板质量的影响

水洗工序作为前处理过程中的关键环节,其参数直接影响基板表面状态和后续磷化质量[1]。鉴于实际生产中锈蚀发生于脱脂后的水洗工位,本研究模拟了该工序条件。在前处理脱脂除油工艺后(时间 3 min),将试样分别浸渍于恒温 30 ℃不同水质(纯水、自来水)及 pH 值(pH8.0、pH9.0)的水洗槽,记录生锈时间,结果如表 2 所示。

表 2 不同水洗条件下的基板生锈时间 min

编号	pH = 8.0 – 纯水	pH = 8.0 – 自来水	pH = 9.0 – 纯水	pH = 9.0 – 自来水
1#	4.5	1.5	5.0	2.0
2#	9.0		8.5	
3#	>10.0	2.0	>10.0	5.5

综合分析表明,水质显著影响基板的生锈时间。相比纯水,自来水因含有氯离子等腐蚀介质,会破坏钢材表面钝化膜,导致生锈时间更短,因此更易诱发腐蚀[3]。对于同种板材,提高水洗 pH 值能够延缓板材表面生锈的时间。如表 2 所示,自来水的 pH 值由 8.0 增加到 9.0 时,1#、3#试样表面的生锈时间分别从 1.5 mm、2.0 min 提高到 2.0 min、5.5 min,提高了板材的防锈能力,较高 pH 值有利于增强试样表面氧化膜的稳定性。3#试样相较 1#及 2#试样均有着更长生锈时间,说明基板在脱脂后有着更好的防锈能力;而 2#试样在纯水中相较 1#试样有着更长的生锈时间,可能与人工涂油后导致脱脂残留有关,阻止了基板与腐蚀介质的直接接触[1]。目前绝大多数车厂的涂装线水洗工序均采用自来水,且每道水洗时间为 1 ~ 2 min,为防止样板水洗后出现锈蚀,需要至少保证水洗 pH 值在 8.5 以上,以确保基板在进入磷化工序前保持良好的表面状态。

2.2　磷化后板材防锈性能研究

2.2.1　磷化膜形貌与结构特征

磷化膜作为连接基材与电泳漆的中间层，其质量直接决定最终涂装产品的耐腐蚀性能[4]。图 1 为不同试样扫描电镜（SEM）下形貌，所有试样的磷化膜覆盖率均能达到 100%，磷化膜呈现均匀致密的短棒状结晶结构，1#、3# 试样平均晶粒尺寸为 4.5 μm，2# 试样晶粒尺寸增大至 5.0 μm，且分布均匀性下降。这是由于人工涂油导致的前处理不彻底，影响了磷化晶核的均匀形成和长大。



（a）1#试样　　（b）2#试样　　（c）3#试样

图 1　磷化膜 SEM 形貌

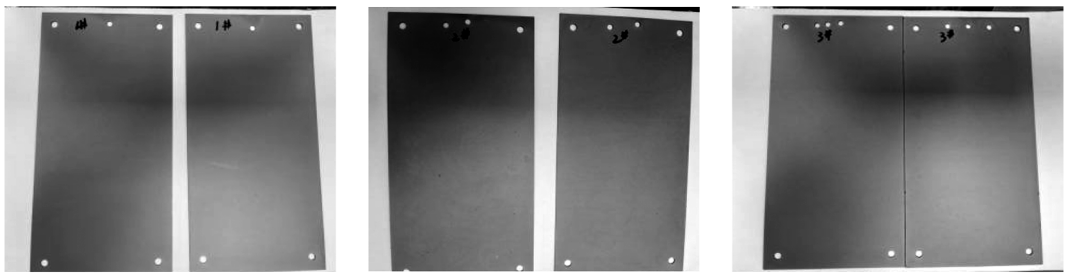
通过脱膜称重法测得磷化膜重如表 3 所示，3# 试样膜重达到 5.5 g/m^2，高于 1# 和 2# 试样的 5.0 g/m^2 和 5.1 g/m^2。较高的膜重与 3# 样板粗糙度较高有关，粗糙表面提供了较多的磷化膜形核位置，更有利于形成更厚且致密的磷化膜层[5]。综合微观形貌与膜重分析，磷化膜质量排序为 3# 试样最优，1# 试样次之，2# 试样最差。

表 3　磷化膜参数

编号	覆盖率/%	平均磷化相尺寸/μm	磷化膜重/(g·m^{-2})
1#	100	4.5	5.0
2#	100	5.0	5.1
3#	100	4.5	5.5

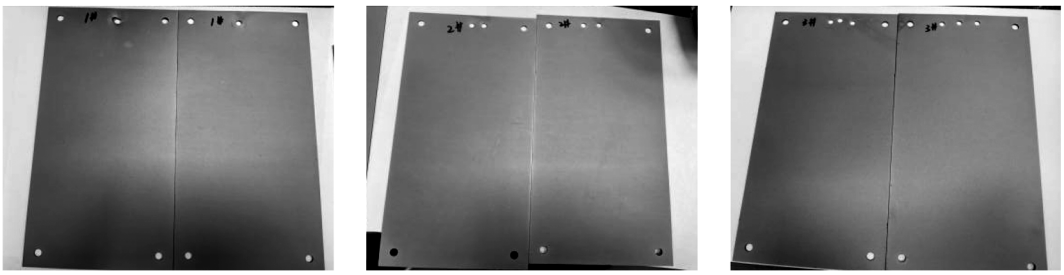
2.2.2　磷化板耐腐蚀性能评估

将 3 种磷化板在湿热试验箱内放置 140 min，试验条件为 100% 湿热，40 ℃ 恒温，取出后用自来水冲洗，吹干，目视表面锈蚀情况，1# 试样已出现泛黄，面积比例达到 10% 左右，2# 试样绝大部分表面已泛黄，比例达 80% 以上，3# 试样仅出现小面积泛黄，比例小于 2%，见图 2。耐腐蚀性能从优到劣依次为 3# 试样、1# 试样、2# 试样。将 3 种磷化板试样在 5% 氯化钠溶液中浸泡 2 h 后全部取出，肉眼观察比较不同板材的生锈程度。1# 试样表面局部出现点状腐蚀，边部轻微泛黄，2# 试样表面泛黄面积较大，3# 试样表面基本没有变化，耐腐蚀性能从优到劣依次为 3# 试样、1# 试样、2# 试样，见图 3。综合两项腐蚀试验结果，耐腐蚀性能排序为 3# 试样、1# 试样、2# 试样，该排序与磷化膜的微观结构质量特征吻合。



（a）1#试样　　（b）2#试样　　（c）3#试样

图 2　磷化板湿热试验结果



（a）1#试样 （b）2#试样 （c）3#试样

图3 磷化板5%氯化钠溶液浸泡试验结果

研究证实，表面粗糙度（Ra）与峰值密度（RPc）的协同作用是决定磷化膜质量的核心。较高的Ra值（如3#试样为1.27 μm）为磷化反应提供了更丰富的形核位点，促进了晶粒尺寸均匀、致密的高膜重磷化层形成[5]；而高的RPc值（如3#试样为90.3 cm^{-1}）则引导磷化晶体沿基体峰脊横向生长并相互交织，形成强机械“钉扎”结构，从而显著提高膜层附着力。二者共同构成的“Ra－RPc协同机制”是获得优异耐蚀性的基础[6]。相比之下，仅高RPc而Ra不足（如1#试样），无法形成理想防护膜。2#试样因采用人工涂油导致油膜不均、脱脂不净，严重阻碍了磷化膜的均匀形核与生长，形成结构性弱点，容易在盐雾腐蚀下成为起泡源点，造成其涂装性能显著劣化。

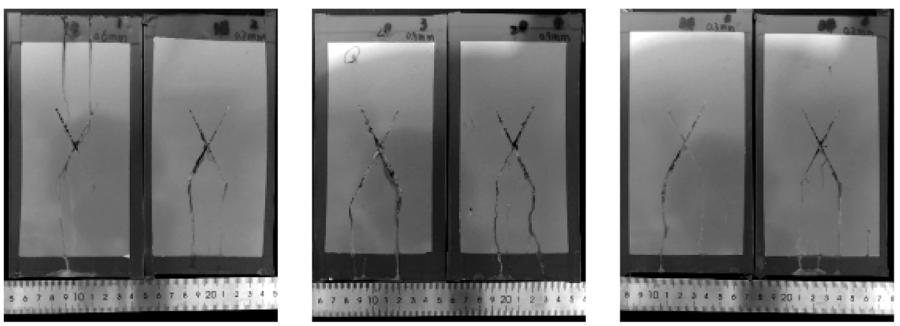
2.3 涂装性能验证

分别对1#、2#、3#电泳漆板试样进行漆膜厚度、粗糙度、漆膜附着力检测，结果如表4所示。3种电泳漆板试样膜厚差异不大，3#试样电泳漆膜粗糙度较1#、2#更大，这与3#试样基板粗糙度值较大有关，形成遗传效应。所有试样电泳漆膜附着力检测均达能到标准要求，划格后强力胶粘无漆膜脱落。

表4 电泳漆膜参数

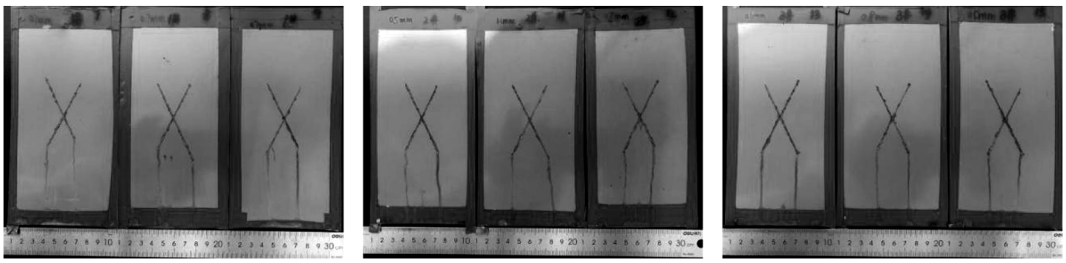
编号	电泳漆膜厚/μm	粗糙度/μm	附着力
1#	20	0.16	0级
2#	20	0.14	0级
3#	21	0.26	0级

采用1 000 h中性盐雾和60周期交变盐雾试验验证电泳漆膜防腐蚀性能，如图4、图5所示，其划线腐蚀宽度均值如表5所示。1 000 h中性盐雾试验中，3#试样划线腐蚀宽度均值为0.2 mm，较1#试样0.6 mm及2#试样0.9 mm更小；60周期交变盐雾试验，3#试样划线腐蚀宽度均值为0.6 mm，较1#试样0.7 mm及2#试样0.8 mm更小。3#试样在1 000 h中性盐雾和60周期交变盐雾试验中均表现出最小的划线腐蚀宽度，进一步证实通过优化基材状态与前处理工艺获得的高质量磷化膜，能够有效保障电泳漆板具备优异的长期耐腐蚀性能。



（a）1#试样 （b）2#试样 （c）3#试样

图4 1 000 h中性盐雾试验



（a）1#试样　　（b）2#试样　　（c）3#试样

图 5　60 周期交变盐雾试验

表 5　电泳漆板盐雾试验结果

编号	1 000 h 中性盐雾		60 周期交变盐雾	
	划线腐蚀宽度/mm	基板起泡	划线腐蚀宽度/mm	基板起泡
1#	0.6	无	0.7	无
2#	0.9	无	0.8	无
3#	0.2	无	0.6	无

3　讨论及建议

综合以上试验结果，为稳定提高深冲汽车钢的涂装适配性，首先，防锈油的处理方式是一个至关重要的工艺控制点。人工涂油的不可控性易导致脱脂不干净，引入质量波动风险点，应予以杜绝。建议采用精准的自动化涂油设备并根据下游客户的前处理工艺，选择合适的防锈油类型和涂油量。其次，基材表面粗糙度（Ra）和峰值密度（RPc）是影响磷化膜质量的关键几何参数，需要建立严格的表面质量控制标准，优化表面形貌，将 Ra 与 RPc 作为关键质量特性进行监控。建议 Ra 值在 1.2 μm 左右，RPc 值不低于 90 cm^{-1}，二者产生协同效应，有助于形成致密且附着力强的磷化膜，奠定优异的耐腐蚀性能基础[6]。再次，自来水作为前处理水洗工序的普遍用水，为补偿其对腐蚀性的不利影响，确保水洗工序 pH 值稳定在 8.5 以上，保证基板进入磷化前的表面质量。最后，将磷化膜重、结晶形貌作为在线监测的快速响应指标，以中性盐雾试验和交变盐雾试验的划线腐蚀宽度、基板起泡情况作为最终判定依据。同时，需要制定科学的存储周期标准和包装方式，避免长期存储导致的表面状态退化。

4　结论

（1）涂装前处理水洗工序的 pH 值与水质显著影响基板耐腐蚀性，建议水洗 pH 值控制在 8.5 以上，以应对自来水水质带来的不利影响。

（2）基材表面几何参数是决定磷化膜质量的关键因素，合理的粗糙度（Ra≈1.2 μm）和峰值密度（RPc≥90 cm^{-1}）协同作用可显著提高涂装耐腐蚀性能。

（3）防锈油处理工艺直接影响涂装前处理效果，应避免使用人工涂油方式，确保脱脂均匀彻底。

参　考　文　献

[1]　殷坤，李啸，徐腊平，等. 涂装前处理冷轧板磷化膜白点缺陷研究[J]. 涂料工业，2019，49（11）：71－76.

[2]　刘承鑫，黄平，刘雁车，等. 车身钢板及不同电泳膜厚对耐蚀性的影响研究[J]. 上海涂料，2017，55（2）：5－8.

[3]　赵海强. 冷轧板锈蚀原因分析及改进[J]. 安徽冶金科技职业学院学报，2021，31（3）：8－10.

[4]　任彬彬. 冷轧汽车板磷化膜品质的评价方法研究[J]. 中国涂料，2018，33（1）：66－69.

[5]　高立军，杨建炜，章军，等. 表面粗糙度对冷轧汽车板磷化膜耐腐蚀性能的影响[J]. 四川冶金，2015，37（5）：32－35，45.

[6]　杨维宇，刘妍，刘恩泽，等. 影响冷轧板表面转化膜形成质量因素研究[J]. 电镀与精饰，2024，46（9）：5－8.