

汽车涂装前处理薄膜工艺替代磷化工艺的垂直切换实践与研究

朱 铁

(一汽-大众汽车有限公司, 长春 130011)

摘要: 为贯彻国家节能环保战略和“双碳”目标,推动绿色转型和经济发展同步,多数汽车企业对传统耗能大、金属离子及危废多的传统磷化工艺进行升级,应用薄膜工艺进行替代,达到环保降本的目的。本文根据切换过程实际,按照工艺需求,制定完善的工艺规划流程,仅用9 d就实现了薄膜硅烷工艺的垂直切换,成功实现批量生产。为确保切换效果,前期完成了充分的工艺验证,涵盖了预处理及电泳材料的选型、产线工艺规划、相关设备改造方案及清洗等关键环节的制定。切换过程中形成的探索性研究成果及实践结论,可为同行业类似项目提供有益借鉴。

关键词: 硅烷; 前处理; 外观; 电泳

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2026)02-0023-05

The Practice and Research of Vertical Switching of the Film Process for Automobile Coating to Replace the Phosphating Process

ZHU Tie

(FAW-Volkswagen Automobile Co., Ltd., Changchun 130011, China)

Abstract: In order to implement the national energy conservation and environmental protection strategy and the "dual carbon" strategy, promote green transformation and economic development synchronously, most automobile companies have upgraded traditional phosphating processes for energy consumption, multi-metal ions, and hazardous waste, and applied thin film processes to replace them, achieving the goal of environmental protection and cost reduction. According to the actual switching process and the switching process requirements, a perfect process planning process was developed in this paper. The vertical switching of thin film silane process was achieved in only 9 days, and the mass production was successfully achieved. To ensure the switching effect, sufficient process verification was completed in the early stage, covering the selection of pre-treatment and electrophoretic materials, production line process planning, related equipment transformation plans, and the formulation of key links such as cleaning. The exploratory research results and practical conclusions formed during the switching process can provide useful reference for similar projects in the same industry.

Key words: oxsilan technology; pretreatment; appearance; CED

0 引言

薄膜前处理作为先进的预处理工艺, 目前在国内

已实现一定规模的推广应用。相比传统磷化工艺,它在车身生产中更环保,更节能,且适配多种金属基材,尤其能解决磷化处理铝制材料时,因铝离子析出产生大量冰晶石沉渣而影响整车涂装品质的问题^[1]。

尽管薄膜前处理在绿色环保方面具备显著优势,但对于已采用磷化工艺的汽车涂装生产线而言,其升级改造需先行攻克一系列工艺、工程技术难题,方可实

收稿日期: 2025-10-09

作者简介: 朱铁(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事汽车涂装生产制造管理和工艺应用与研究。E-mail: tie.zhu.qingdao@faw-vw.com。

现工艺升级替换。具体涵盖薄膜前处理与电泳工艺材料的选型及工艺匹配、相关设备的改造,以及工艺切换后如何应对可能引发的各类质量问题等。因此,汽车主机厂在推进该类升级项目时均持审慎态度,在切换前会开展一系列的工艺验证工作。为了尽可能降低切换导致的生产停线,通常会选择节假日进行切换,但同时也要考虑前期如何进行合理的工艺规划,实现最短时间切换的可能性。在充分借鉴行业经验并结合自身探索研究的基础上,某汽车涂装线上借助“五一”假期,前后共用了9 d时间完成了从磷化前处理到硅烷薄膜前处理的设备清洗、新材料投槽、工艺调试和批量生产^[2]。本文将从材料选型思路、工艺规划方案和投槽批量生产后问题解决等3个方面,介绍此次升级的应用实践。

1 材料选型

预处理薄膜材料是C公司的硅烷薄膜Oxsilan 9835,其中脱脂材料是含磷脱脂剂S5176,电泳材料是B公司CG800 RE。

1.1 脱脂材料

由于硅烷膜纳米级膜厚的特性,在遮盖力、抗污染能力方面弱于传统磷化。磷化处理的工艺条件通常为:温度42~52℃,pH 3.0~3.2,车身表面残留的油脂会得到进一步清洗去除的可能。然而,薄膜处理的工艺条件相对温和,通常为:温度25~45℃,pH 4.0~4.5,这样的条件几乎不存在进一步清洗的可能。所以由脱脂工序造成的板材损伤、除油不干净等问题会导致硅烷处理后局部无法成膜或成膜不完整,将影响转化膜的表面质量,进而影响整体涂装的结合力^[3]。

结合其他主机厂的经验,在整个脱脂工序中,除了确保脱脂干净,也要考虑车身在脱脂槽体、水洗槽体以及过渡段中的过程防护能力,避免在已经清洗干净的车身表面发生微腐蚀,导致后续转化膜的不连续,影响整个涂装工艺的附着力性能^[4]。针对以上两点,我们在选择脱脂材料时,要求供应商进行一系列的工艺匹配性验证。

1.1.1 清洗能力

采用供应商的最小清洗时间(MCT)测试。具体测试方法如下:首先在板材上均匀涂抹现场使用的油品,然后把测试板材放入脱脂槽液内进行浸渍脱脂,能在5 min内清洗干净,表面不挂水,表明符合产品要求。试验结果符合要求。

1.1.2 过程防护性能

采用车身热镀锌进行测试。试验过程:一组进行正常实验室条件脱脂;另外一组正常脱脂后,在一个封闭的喷淋室体进行10 min的碱雾加载,其目的是模

拟现场预处理通道内高温高湿状态。两组脱脂后的板都进行后续正常水洗,然后再用SEM观察盐雾加载后的板材表面是否存在晶体颗粒(腐蚀产物)。结果表明:2组板材都不存在晶体颗粒,说明该脱脂材料在过程防护性能上是符合薄膜硅烷工艺要求的。

1.2 硅烷材料

在选择薄膜材料前期,协同规划部门进行了一系列的试验验证。

1)打磨印和油石印外观验证:试验零件采用某车型的热镀锌翼子板、热镀锌门板和铝材质的前盖和后盖;试验方法:在白车身上进行打磨和划格,然后分别观察电泳、面漆后的外观;试验结果:电泳后基本能够覆盖,在不打磨的情况下面漆可以完全遮盖。

2)附着力验证:试验零件同上;在进行正常电泳、面漆后进行划格测试;划格附着力为0级,符合质量要求。

1.3 电泳材料

由于薄膜和磷化工艺中转化膜的差异,在电泳材料的选择上,除了进行常规的电压梯度和针孔电压测试外,我们进行了以下匹配验证。

1.3.1 泳透率验证

采用四枚盒法,在确保A面膜厚20 μm,且在正常电压和温度条件下进行试验测试,结果要求泳透率G/A≥60%。试验结果表明,CG800 RE与硅烷匹配的结果与传统磷化一致。

1.3.2 膜厚均一性

同一板材的电泳膜厚差异:在硅烷后的测试板材上进行实验室电泳,每块板选取9个测试点进行膜厚测试,试验结果:膜厚差异基本在2 μm左右,与磷化工艺基本一致;不同板材上的膜厚差异:测试板材包括冷轧板、镀锌板和电镀锌板等,在相同的电泳条件(包括温度、电压和槽液参数)下进行测试,试验结果:不同板材上的膜厚基本一致^[6]。

1.3.3 打磨印遮盖能力

主要针对热镀锌板材,用砂纸进行露底(打磨到冷轧板)和非露底打磨,然后在实验室进行预处理和电泳,观察对缺陷的遮盖能力。

由于薄膜转化膜非常薄,无法遮盖板材上的缺陷,阻抗值较传统磷化低很多,所以在电泳选材上,我们进行了以上测试。目的是为了在确保腔体内部电泳膜厚的同时,不提高外表面膜厚,即需要较高的电泳泳透率性能,避免单耗的增加;同时,电泳材料要具有良好的缺陷遮盖能力,尽可能减少在后续生产过程中发生的外观问题^[7]。

2 工艺规划

完成工艺材料的选型,开始制定工艺规划方案,包括设备改造、槽体和管路清洗、初步工艺文件的制定,以及应急预案的制定。

2.1 设备改造

整个槽体规划和设备改造相对简单,如图1所示,相关的设备、管路改造如下。

1)原来4区的表调工序取消,用水洗槽取代(见图1-①→④);

2)原来6区磷化槽体改为硅烷槽(见图1-②→⑤);

3)原来9区钝化槽体取消,从整个硅烷工艺考虑,6区硅烷结束后,已经有2道水洗,且完成了硅烷成膜,所以决定进行空槽处理,这样也有利于水资源的节约(见图1-③);

4)由于槽体原有功能发生变化,加料站也要根据需要进行改造和新增;4区和8区水洗槽改造为中和剂加料(见图1-⑦);4区原表调区加料站改造(见图

1-⑧);新增6区硅烷槽的快速加料站(见图1-⑨);新增7区和8区促进剂加料(见图1-⑩);由于改造后4区和5区都是水洗槽,又增加了5区到4区之间的溢流管路和控制阀门,5区原溢流管路加控制阀门,节省用水,(见图1-④);

5)原6区磷化出口纯水喷淋改造,原磷化出口纯水喷淋保留,更改为工业水和纯水可切换;增加一道雾化喷淋,另增加一道喷淋管路,并向磷化区移动1m,目的是防止Oxasilan的二次反应,尽可能减少电泳后的条纹印问题(见图1-⑤);

6)前处理电泳间U型弯道加装5道雾化加湿喷淋,并增加随车喷淋控制程序。保持车身水膜连续,减少电泳后条印问题(见图1-⑥);以上喷淋的增加也是借鉴了其他主机厂切换时的经验,但是由于产线的差异,在后期实际使用过程中也并非都要全部用到。但是作为前期的工艺规划,考虑必须充分,避免后期二次设备改造^[8]。

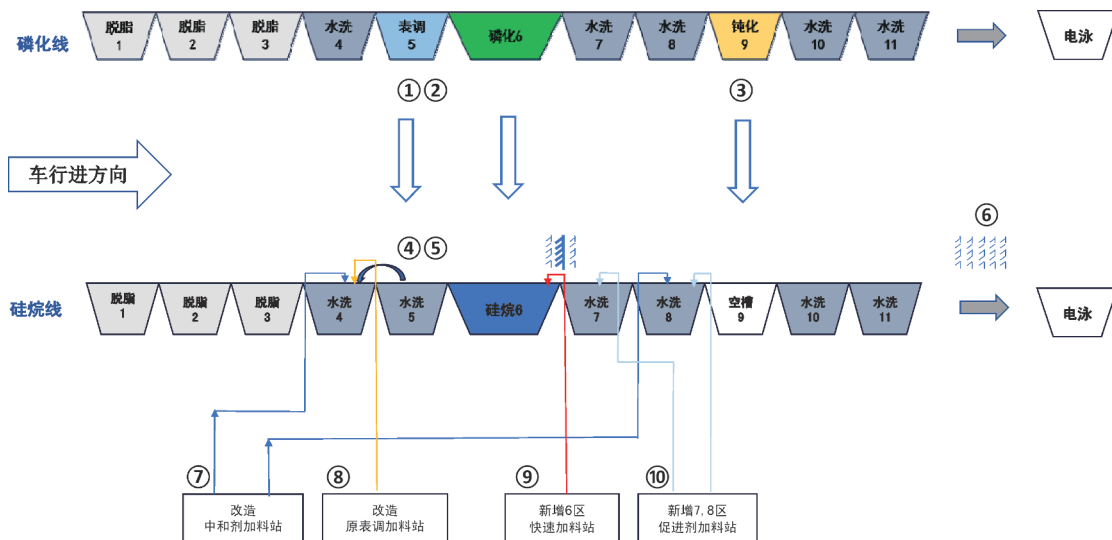


图1 工艺流程

2.2 槽体和管路清洗

槽体和管路的清洗是硅烷切换磷化过程非常重要的一环,清洗不彻底,会直接导致投槽失败及车身报废。有序的计划安排,不但可以做到时间和效率上的提升,同时也可以尽可能减少化学酸洗材料的消耗和酸液废水的处理费用。不同槽体,有酸洗和常规清洗两种方式^[9]。

2.2.1 酸洗

彻底去除原来槽体中残留的磷化渣和硫酸根离子,防止这些离子对新配制的薄膜硅烷槽液造成不稳

定,导致后续成膜不连续或者无法成膜。每个槽体酸洗后需要用工业水清洗3遍,最后一遍纯水水洗;先进行pH测试,当pH>6时,再进行槽液磷酸根离子的ICP检测,要求检测结果为ND(未检出)。

1)槽体酸洗

为减少化学品的消耗和废酸的处理量,在6区主槽(原来磷化槽)酸洗前,先进行4、5、7、8区槽体的酸洗,清洗完毕后再倒入6区主槽进行酸洗。具体清洗要求见表1。酸洗前,需要对加酸设备及备件进行确认;同时必须保证所有管路的通畅,磷化渣先进行人工清

理,这样有利于达到更好的酸洗效果。酸洗后,1~10区通廊表面需全部冲洗一遍,清洗掉酸洗过程中酸雾的残留;同时拆卸管路,查看管路内磷化渣的残留,保证酸洗彻底。

表1 槽体清洗要求

洗槽	温度/℃	时间/h	液位	浓度/%	备注
4,5区	常温	8	95	2	4,5区酸洗后倒入6区
7,8区	常温	8	95	2	7,8区酸洗后倒入6区
6区	48~50	24	80~95	10~12	6区酸洗后废酸排放倒入备槽

2) 加料系统酸洗

加料系统的酸洗包括加料罐、加料泵和加料管路。清理收集加料管内残留物,用临时加料泵把加料罐内物料收集到专用容器内;用清水冲洗加料罐及管路;用2%浓度的酸液冲洗管路;水洗冲洗管路,保证加料罐内pH为6~8即可。

2.2.2 常规清洗

包括8、9、10、11区:针对槽体两边的通道、平台都进行常规清洗。同时需要人工清理滑橇上残留的磷化渣,再用高压水枪清理,确保滑橇表面无残留。

由于继续沿用原来的脱脂材料,所以3个原有的脱脂槽体无需进行清洗。另外,产线在由磷化向硅烷切换过程中,为确保原磷化槽液的安全转移与后续处理,制定了详细的转运过程计划与时间节点,确认废液储备地点与转运路径,以确保转运过程符合环保与安全规范要求。

2.3 工艺文件制定

为确保投槽后的顺利生产,一份完善的工艺控制文件是必须的。其中包括了每个槽体的材料加料量和加料频次、每个槽体的工艺参数控制范围,尤其是硅烷槽的一些关键参数的控制,比如Zr、Si、FF、Cu等,这些参数直接会影响整个成膜体系和膜重。针对不同板材,规定了膜重要求:热镀锌60~200 mg/m²,铝板和冷轧板15~140 mg/m²。同时,在每班开班前需对硅烷膜重进行检测,只有符合膜重工艺要求才能进行过车生产。

2.4 应急预案

由于硅烷工艺对于停线比磷化工艺要敏感,施工窗口窄,为降低前处理故障车身的报废率,确保整个产线的质量,针对薄膜工艺制定了应急预案。

1)当前处理区域发生槽液温度、槽液参数超出工艺范围,以及重要喷淋停喷等故障时,操作工应立即通知预处理入口停止车辆放入预处理(槽内车辆可继续

运行),预处理人员负责通知工艺相关人员,待故障修复后且相关参数达到工艺要求时,方可正常放行车辆。

2)预处理区域的操作工应及时将超过5 min以上故障车信息(停线车身的滑橇号、车身号)告知预处理工艺等相关技术人员,必要时需进行相关车身质量的检查。

3)若预处理发生输送故障,当输送停顿1 min后,硅烷槽泵需自动停止;当输送重启后,硅烷槽泵自动开启。在发生输送故障时,操作工应及时关闭硅烷槽自身喷淋,并开启所有应急喷淋。在设备允许的情况下进行预处理区域的停、放间歇操作。

3 投槽切换和批量生产

3.1 投槽切换

在投槽切换之前,先根据前期工艺规划方案进行设备改造,由于改造相对简单,在周末停产的2天时间就全部完成了改造工作。本着节约水资源的考虑,在投槽初期针对9区实施空槽处理,预处理到电泳U段的5道雾化喷淋未开启。按照前期计划,总共用了9 d时间完成了垂直切换:

第1~5天槽体排空和清洗;第6~7天槽液配制和熟化;第7~8天槽液参数调整和生产调试;第9天批量生产。

在2 d的生产调试过程中,需对整个预处理生产环节进行检查,包括:设备运作情况,尤其是改造后的管路和喷淋;所有预处理和电泳槽液的参数、温度、电压等状态确认;调试车身的硅烷膜重以及电泳后的膜厚状态确认,同时进行在线打磨印模拟验证。1)板材验证:对车身热镀锌板材进行露底打磨和非露底打磨,然后把板材挂在车架上进行预处理和电泳过车;2)调试车验证:在调试车的前盖、门板进行露底和非露底打磨处理,然后同时进行预处理电泳。在线结果表明,打磨区域电泳漆遮盖性能良好。

3.2 现场问题

所有参数都确认无误后,产线完成了垂直切换,实现了全线批量生产。但是随着每日的生产,现场发现了一些外观问题。

3.2.1 流痕印问题

流痕印问题首先仅发生在翼子板区域,一开始的发生率在20%左右;之后,车身两侧后围、车门边缘、车顶盖等边缘位置陆续出现流痕印,流痕轻重不一,后围流痕印最严重,80%以上的车都有流痕缺陷,且大部分流痕都需要打磨处理。现场进行了一系列工序排查和在线试验:在脱脂区域,尝试了包括在脱脂3区和4区之间轻打磨、更新脱脂后4区、5区水洗槽,调大4区、5区喷淋量;在硅烷槽区域,先后尝试了包括关闭

硅烷自身喷淋、调整硅烷出口雾化喷淋角度,使其朝向硅烷方向进行雾化等。但是以上所有措施都无法解决流痕印的问题。

在进行工艺参数查询的时候发现:从偶发流痕印开始一周以来,各水洗槽的温度随着生产进行逐渐上升(见表2),前处理室体温度也同时上升,且预处理出口到电泳入槽处大于5 min,较其他产线长,车身有些区域已经发生了表干,这就导致了整个车身表面的水膜是不连续的,很有可能导致后续电泳的条纹印^[10]。

表2 水洗槽温度变化 ℃

时间	4区水洗	5区水洗	6区硅烷	7区水洗	8区水洗
周一	30	30	32	29	29
周二	40	39	35	34	33
周三	42	40	37	36	33.5
周四	37(新换水)	38.5	37.5	36	33
周五	43	42	37	36	33.5

由于在设备改造时就考虑了这个问题,在U段加装了五雾化喷淋作为保湿。当全部开启U段喷淋后,流痕印问题马上解决了,说明问题的关键点在于通道内温度过高引起的车身局部表干、水膜不连续导致的。

问题虽然解决了,但是从节水、省能源的角度来讲,需要考虑五道喷淋是否需要全部开启还是部分开启?通过在线的多次试验,最后确认仅开启U段中的3、4、5共3道喷淋,且封堵几个喷淋管路中的喷嘴,同时调整喷水压力和方向就能确保车身充分润湿,解决流痕缺陷问题,也尽可能地节约了用水量。考虑到该类车身缺陷情况可能会随着室体温度变化存在季节性的变化,U段加湿喷淋的开启也会随之变化。所以在后续的实际生产中随着生产需求会随时调整U段喷淋设备的开启状态^[11]。

3.2.2 打磨印问题

车身打磨印问题是薄膜切换后不可避免的一个问题。这类缺陷在行业内被称为“天使环”或者“牛眼”。在投槽后不久,在热镀锌和电镀锌的车身上,在打磨印的交界处伴有环状橘皮状波纹(见图2)。产生的原因主要是:镀锌板打磨露出钢板基材,锌铁交界处电位有差异。锌的标准电位是-0.76 V,铁的标准电位是-0.44 V。镀锌板Zn与打磨露底Fe交界处这种不同电化学位位导致的电位差,影响硅烷薄膜沉积及后续电泳的电流分布,从而造成电泳膜厚生长差异,在打磨边缘的Zn与Fe交界处电泳粗糙,形成“天使环”。结合其他主机厂的经验,同时结合产线特点,我们通过以下措施有效地解决此问题^[12]。

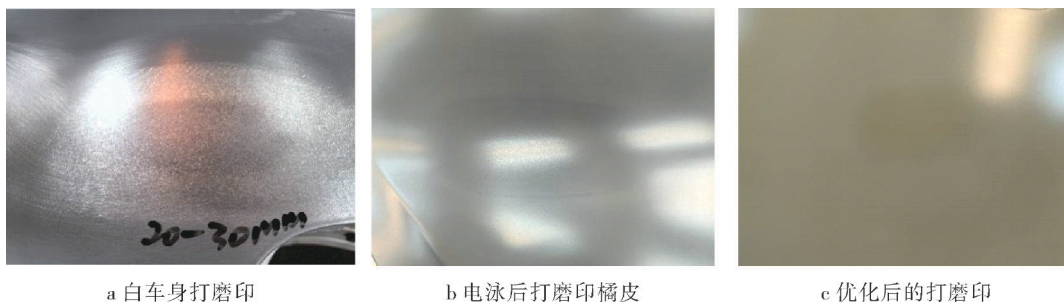


图2 打磨印

1) 车身打磨方式优化:控制打磨力度与范围,避免露底缺陷;打磨时通过同向环形打磨并扩大Zn/Fe界面过渡面积,可有效缓解电位差的集中效应;后续再采用百洁布或800目砂纸处理,有助于提升电泳膜层均匀性,降低“天使环”缺陷发生率^[13]。

2) 前处理参数优化:控制脱脂槽液,避免脱脂碱刻蚀过强;控制硅烷槽液温度,调整硅烷槽液关键参数控制范围,比如pH、FF和Zr等;适当降低硅烷膜重,控制脱脂后和硅烷后水洗槽缓蚀剂点数,降低露底Fe基材在水洗过程中的锈蚀风险。

3) 电泳工序优化:调整电泳工序P/B,在保证电泳

膜厚的基础上,降低入槽电压并适当延长软启动时间,优化电泳反应速度^[14]。

4 结语

在绿色低碳的环保标准不断提升的当下,汽车生产过程中,涂装工艺的环保革新已进入了非推进不可的关键阶段。而从传统磷化前处理转向薄膜前处理,正是涂装工艺实现绿色化转型的必然方向^[15]。

本文重点阐述了从磷化转向薄膜硅烷的材料选择逻辑、工艺规划方案和投槽批量生产后问题解决等三方面。借助9d的停产假期,团队高效完成了从磷化前处理到硅烷薄膜前处理的垂直切换,(下转第50页)