

浅谈汽车涂装电泳逆流循环工艺的实现

赵建伟, 岳金良, 张永彦, 陈浩, 范春阳, 李天贺

(长城汽车股份有限公司技术中心, 河北省汽车工程技术研究中心, 河北保定 071000)

摘要: 主要针对汽车整车厂涂装车间前处理电泳线体中, 电泳槽非采用普通的顺流工艺, 而是选择逆流工艺的调试进行阐述, 重点说明了逆流工艺设计在电泳线体运行成本及车身质量方面的优势, 以及逆流工艺调试过程中需要关注的槽液流动方向、表面流速、层流喷嘴喷射角度等工艺参数, 并结合某汽车整车厂涂装车间电泳槽设备安装调试完毕后, 对逆流工艺试水验证的调试经验进行总结, 并明确电泳逆流工艺调试关注要点。

关键词: 电泳逆流; 表面流速; 层流喷射角度

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)08-0063-05

Discussion on the Realization of Electrophoresis Countercurrent Cycle Process of Automobile Coating

ZHAO Jian-wei, YUE Jin-liang, ZHANG Yong-yan, CHEN Hao, FAN Chun-yang, LI Tian-he

(Technology Center of Great Wall Motor Co., Ltd., Hebei Automotive Engineering and Technology Research Center, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: This article mainly describes the debugging of the electrophoretic tank in the pre-treatment electrophoretic line of the paint shop of an automobile manufacturer, in which the electrophoretic tank does not use the ordinary downstream process but the countercurrent process. It emphasizes the advantages of the countercurrent process design on the operating cost of the electrophoretic line and the quality of the vehicle body, as well as the process parameters that need to be paid attention to during the debugging of the countercurrent process, such as the tank liquid flow direction, surface flow velocity, and laminar nozzle injection angle. After the installation and debugging of the electrophoretic tank equipment in the paint shop of a certain vehicle manufacturer was completed, the debugging experience of the countercurrent process water test verification was summarized and the key points of the electrophoretic countercurrent process debugging were clarified.

Key words: electrophoresis countercurrent; surface flow; velocity laminar flow jet angle

0 引言

在汽车整车厂涂装车间电泳漆膜外观质量不良问题中, 电泳颗粒缺陷占比最大^[1], 经过使用显微镜分析, 发现主要组成为焊球、焊渣、铁粉等金属类颗粒、电泳漆渣、前序胶渣、磷化渣等缺陷, 上述颗粒问题需要

在电泳打磨工序进行研磨修复处理^[2]。以往在改善电泳漆膜品质时, 通过提升前处理工序的清洗效果, 减少前工序带入电泳工序的颗粒数量, 达到降低车身颗粒缺陷的目的, 但是不能彻底根除此问题。因为槽液循环将金属颗粒扩散到大容量的槽体中, 所以空间上很难将金属颗粒完全通过滤袋去除, 导致部分颗粒随车身带液流入后序槽体内, 随生产的进行电泳槽液内也存在金属颗粒。因此需要另辟蹊径, 研究如何让槽液中的颗粒不黏附在车身上, 从而达到削减电泳车身颗粒缺陷目的。此前电泳槽体工艺设计基本为顺流循环工

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 赵建伟(1990—), 男, 本科, 涂装 ME 工程师, 主要从事乘用车新车型涂装 SE 分析、涂装工艺规划、工艺调试和材料选型工作。E-mail: 954207347@qq.com。

艺,电泳逆流循环设计继日系应用后逐渐为国内各主机厂的应用,本文以某主机厂电泳逆流设计及调试关注点进行研讨。

1 电泳逆流设计简介

1.1 电泳涂装原理

1.1.1 带电粒子迁移(电泳)

电泳槽液(通常是水性涂料)中含有大量的带电树脂粒子和颜料粒子。当被涂物(白车身)浸入电泳槽后,在白车身(作为阴极^[4]或阳极)与铜排电极(阳极或阴极)之间施加直流电压时^[4],电泳槽液中带电的树脂和颜料粒子会在电场力的作用下向白车身的方向移动。在阴极电泳涂装中,带正电的树脂粒子向作为阴极的白车身移动。在阳极电泳涂装中:带负电的树脂粒子向作为阳极的白车身移动。

1.1.2 电沉积(析出)

当带电的粒子移动到白车身表面附近时,会发生电化学反应(主要是电解水)。阴极电泳示例:阴极(白车身)发生还原反应: $2H_2O+2e^- \rightarrow H_2 \uparrow +2OH^-$ 。这个反应产生的OH⁻离子在阴极表面聚集,导致电泳槽液局部pH升高。带正电的树脂粒子在接近高pH区域时与OH⁻离子发生中和反应,失去电荷稳定性,从而沉积(析出)到白车身表面上。沉积的粒子是绝缘的,一旦沉积,该区域的电阻将会增大,电场强度开始减弱,使得带电的粒子更趋向于沉积在没有涂覆或涂层较薄的区域,最终在白车身表面形成一层厚度非常均匀的电泳漆膜。

1.1.3 电渗析(脱水)

在沉积过程后期或直流断电后,沉积在工件表面的电泳漆膜是疏松多孔的,里面含有大量的水分、助剂和溶剂。在电场力的持续或余留作用下,电泳漆膜中的水分和离子会穿过疏松的电泳漆膜向与电极相反的方向移动(电渗析),因而从漆膜内部被排出。这个过程使电泳漆膜脱水、收缩、紧密化,这个反应显著地提高了电泳漆膜的致密度和结合力,并大大降低了电泳漆膜在烘烤时产生气泡、针孔等问题的风险。

1.2 电泳逆流起源

20世纪60年代由福特公司开发了电泳涂装,电泳工艺通过电场作用使涂料中的带电粒子在工件表面形成均匀涂层,具有较高的附着力和耐腐蚀性,能有效提升车身等工件的外观效果和耐久性^[5],使车身内腔部位的防腐能力实现了飞跃性提升。当时全球推广的电泳装置就是由电泳主槽和辅槽组成,辅槽配置在主槽的出口处的顺流电泳工艺(槽液表面流向与车身行进的方向是一致的),这种形式逐渐在全世界蔓延开来。

从2000年开始,作为电泳车身颗粒对策的一环,

日本帕卡工程公司注意到槽液内涂料的流速影响电泳颗粒,在那时的改造要件中萌生了“利用车辆行进速度”的想法,创立了PMT(Parker Magic Turn)逆向流循环方式这一专利技术,并于2007年10月在我国汽车涂装技术交流会上,宣讲了此技术,随后国内主机厂开始逐步应用电泳槽液逆流工艺^[6],电泳槽液逆流即槽液表面流向与车身行进的方向相反,电泳顺流工艺和逆流工艺如图1所示。

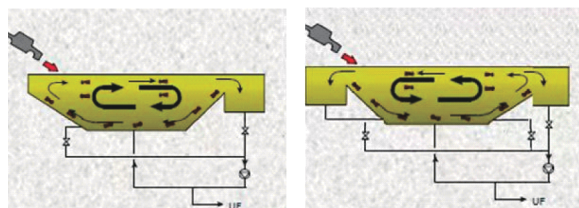


图1 电泳顺流(左)逆流(右)示意

1.3 电泳逆流流速要求

通过结合专家工作经验及对使用此工艺的主机厂现场的调研,对电泳槽液循环方式提出改进——电泳槽液逆向循环系统,逆流循环系统与车身行进方向相反,增大过程中槽液对车身的冲刷,使车身与槽液内颗粒相对流速增大,将附着在车身上的颗粒及电泳过程中所产生的氢气泡排出,提高电泳涂装品质,该系统的主要设计厂家有大气社、Parker、杜尔、中机九院。采用电泳逆流循环,能够有效降低车身的颗粒^[7],其原理如图2所示,流速与铁粉移动距离的关系如图3所示。

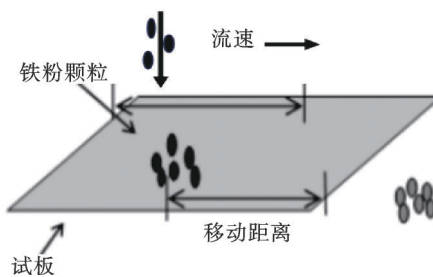


图2 颗粒不黏附车身原理

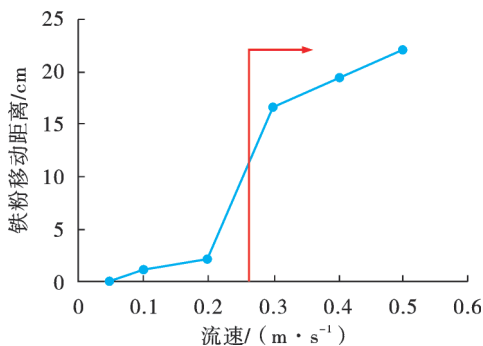


图3 流速与铁粉移动距离的关系

由图3可知,当槽液流速达到0.2 m/s以上时,金属颗粒会从试板表面被卷起并移动,即相对流速在0.2 m/s以上时,金属颗粒便不再附着于车身表面上。因此逆流相对流速为电泳槽内循环流速加上车身行进流速,逆流循环相对于顺流循环更能轻易达到该流速要

求,故逆流循环能更有效地降低车身颗粒缺陷。

1.4 电泳逆流循环与顺流循环在设备结构上的差异点比较

电泳逆流循环与顺流循环存在一定差异,其设备差异点见表1所列。

表1 电泳逆流和顺流差异点比较

功能	电泳顺流	电泳逆流
行进方向	与车身前进方向相同	与车身行进方向相反
相对流速	循环流速-行进速度	循环流速+行进速度
辅槽	出槽端设计1个	2个,出入槽端各1个,出入槽辅槽设计主要用于将残渣及泡沫清除
设备形式	设计在槽内循环的辅槽处及锥底循环处,保持全循环量过滤	全循环流量过滤
形式对比	辅槽占10%~15%,设计辅槽泵吸口及主槽锥底泵吸口	入口及出口辅槽循环量各占15%~20%,设置2个辅槽及主槽锥底3个泵吸口,主槽的泵吸口能力分配为入槽端>出槽端
循环次数要求	4~6次/h	≥3次/h
溢流堰	1个	2个,出槽端辅槽溢流堰落差3~8 cm
能耗及运行成本(同流速要求)	高	较低

经以上差异点分析可以了解到,二者设备形式设计存在一定差异,逆流设计较顺流设计同样的流速设计情况下,逆流设计在节能方面优于顺流设计。

2 电泳顺流工艺与逆流工艺调试研讨

2.1 电泳顺流循环与逆流循环的设计原理分析

2.1.1 某主机厂电泳顺流循环设计原理

以某主机厂涂装车间电泳顺流线体为例进行研讨,其电泳原理设计示意如图4所示。

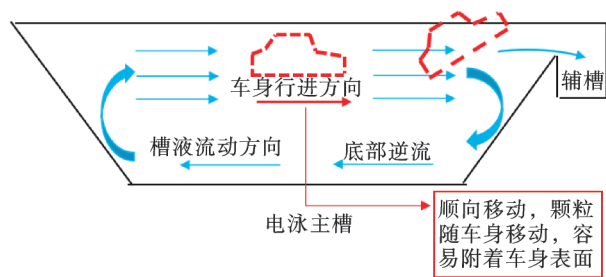


图4 某主机厂电泳顺流原理设计示意

由图4可知,电泳顺流槽体为船型,出槽端设计一个辅槽,主槽底部吸口在入槽侧,通过底部喷嘴与层流喷嘴的调整,使车身入槽时和槽内行进时与槽液呈顺向流动,提升上膜速率,但是槽液内颗粒也随车身移动,容易附着/沉降在车身水平面上,形成车身外表面颗粒问题。此顺流工艺设计的主要目的为:1)减少电泳屏蔽效应,在白车身内部空腔、缝隙等区域,顺流的槽液能更有效地流入,确保这些难以到达的区域也能让足够的涂料粒子沉积上,涂层覆盖更加均匀;2)提高了

泳透力,槽液的定向流动有助于带电粒子更好地进入白车身内腔,提升内腔的涂装效果(泳透力)。

2.1.2 某主机厂电泳逆流循环设计原理

以某主机厂涂装车间电泳逆流线体为例进行研讨,其电泳原理设计示意如图5所示。

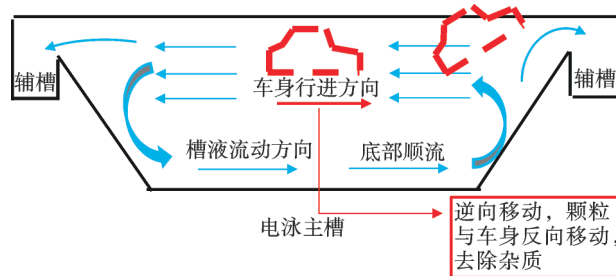


图5 某主机厂电泳逆流原理设计示意

由图5可知,电泳逆流槽体为菱形双辅槽设计,辅槽设计在出入槽两侧,分别配备循环吸口,主槽底部吸口在入槽侧,通过底部喷嘴与层流喷嘴的调整,使车身入槽时和槽内行进时与槽液呈逆向流动,实现槽液向车身的逆向冲击效果,同时两端表面槽液向辅槽流动,带出槽液残渣,减少杂质对车身附着隐患,通过以上设计思路,可实现当白车身进入电泳槽后,与逆向流动的电泳液充分接触。一方面,逆向流动的电泳液能够不断冲刷白车身内外表面,使涂料可以更均匀地附着在白车身内外板上,提高电泳涂层的质量;另一方面,随着白车身的移动,电泳槽液中的涂料粒子不断地被消耗,而逆向流动的电泳槽液能够及时补充新鲜的涂料,保

证电泳槽内涂料浓度的相对稳定性,从而提高了涂料的利用率。

2.2 试水验证准备

某主机厂为新建工厂,涂装车间为提升产品质量,降低设备投资与能耗,引进电泳逆流工艺,由于首次应用此工艺,为识别此工艺的潜在风险、确认电泳逆流工艺设计的可行性,需要对设计要求及材料厂家需求进行同步验证,在电泳槽体设备安装、调试完成后,结合设计院、设备供应商、材料供应商等多方对电泳槽开启逆流试水验证,提前验证电泳逆流工艺的可实施性,防止直接对电泳漆投槽后,无法实现逆流工艺时,影响设备改造,其验证过程如下所述。

2.2.1 设备系统开启条件点检

- 1)电泳主槽体内挡板、溢流堰、泵吸口保护网安装完成;
- 2)槽体及超滤附属管路、压力表安装完成;
- 3)水泵、袋式过滤器、板式换热器、阀门等外购件安装完成;
- 4)循环搅拌喷嘴、侧面层流喷嘴安装完成;底部、辅槽喷嘴的安装间距和安装角度,结合图纸逐一检查一致性;
- 5)水泵润滑剂加注完毕。

2.2.2 电控条件点检

- 1)用电点及容量适用性确认完成;
- 2)水泵线缆接线完成,点动水泵的正反转,确认水泵具备启停条件;
- 3)水泵运转监控线路安装完成。

2.2.3 供排水条件点检

- 1)协调取水点及运输、周转工具;
- 2)协调排水、运输工具及排放点。

2.2.4 检测工具配置条件点检

- 1)协调槽液流速检测工具;
- 2)配置温度测量仪。

2.2.5 设备系统启动

- 1)阀门开、闭状态确认,转移管路阀门切断、重力排放阀门切断,超滤系统关闭进液管路切换为旁通模式;
- 2)顺序启动循环泵、超滤泵;
- 3)确认泵的运转电流、温度是否属于正常范围;泵处理压力、搅拌管、层流管压力是否属于正常范围。

经过确认,电泳槽补水、管路试漏完成,轴封系统调试完成,对电泳主循环泵进行点动调整及试运转无问题。

2.3 逆流验证调试

电泳逆流调试验证目标主要有 2 项,分别是流向

及流速要求,见表 2 所列。

表 2 逆流验证目标

项目	要求	响应(调整目标)
流向	入槽端表面槽液流向	向入槽端辅槽流动
	中部槽液流向	向入槽端流动
	出槽端表面槽液流向	向出槽端辅槽流动
流速	槽液流速	0.2~0.4 m/s(泡沫流入辅槽)

经过系统分析,影响流向及流速主要的响应变量为喷嘴角度、泵吸口阀门开度等,具体响应变量及控制方式见表 3 所列。

表 3 逆流响应变量及控制方式

序号	响应变量(调整维度)	调整方式	评价方式
1	底部层流喷嘴角度	底部喷嘴与槽底间角度	角度
2	侧面层流喷嘴角度	侧面喷嘴与槽壁间角度	角度
3	主槽吸口阀门开度	阀门开度	开度
4	辅槽吸口阀门开度	阀门开度	开度

采用 DOE(试验设计)的工作理念,将喷嘴角度、阀门开度等调整维度视为响应变量,调整目标为响应,将响应变量与水平输入 Minitab 制作 4 因子 3 水平的试验正交表,通过使用乒乓球投入槽液,观察其流动方向,判定响应(调整目标)结果,选出最优因子水平。

通过试验,选择最优样本组合:入槽端侧面层流喷嘴角度设定为 30°,出槽端侧面层流喷嘴角度设定为 30°,主槽吸口阀门开度 70%,辅槽吸口阀门开度 100%,由现场设备厂家、材料厂家、调试工程师、基地生产部门等多方确认,电泳槽液表面流动无死角,两侧向中央扰动幅度相当,电泳槽前端至底部搅拌位置及搅拌位置至电泳槽末端,表面流分别向入槽端及出槽端流动明显,入槽端及出槽端溢流高差明显,调试结果满足电泳逆流方式要求。

2.4 流速测定

电泳槽液逆流流向调试完成后,需要使用流速测定仪对槽液流速进行测量,建议对电泳槽测量 4 个点,分别为:入槽端东侧、入槽端西侧、出槽端东侧、出槽端西侧,对此 4 个点验证流速效果。

通过测量,槽液流速分别为:入槽端东侧 0.4 m/s、入槽端西侧 0.3 m/s、出槽端东侧 0.3 m/s、出槽端西侧 0.4 m/s,以上数据均满足逆流工艺设计的流速要求 0.2~0.4 m/s。说明本次电泳槽逆流测试可实现逆流工艺。

2.5 泡沫(残渣)流入辅槽时间验证

泡沫生成位置为车身入槽阶段,在尾部完全进入

槽体区域时, 车身内部的气体排出, 导致形成大量泡沫, 当泡沫在两车间距时间内流入辅槽可避免泡沫黏附在车身上, 通过核算工位长度及车身长度差值, 理论计算间距时间, 即泡沫流动实际测量时间在间距时间范围内可满足工艺要求。

通过实际测量现场泡沫流动时间, 在间距时间之内, 判定泡沫流入辅槽时间满足要求, 槽液表面流速达到预期水平。

3 结语

本次测试采用工业水初步完成试水调试, 电泳槽液整体达成逆流工艺要求效果, 未出现混流现象, 槽液表面流速在标准范围内, 但电泳槽液的密度要高于工业水的密度, 进而在电泳漆投槽后会产生不确定性因素, 需要在电泳漆投槽后进行再次确认及喷嘴方向或阀门角度调整, 以满足逆流工艺要求。

综上, 本文简要阐述了电泳逆流调试的关注点, 主要体现在泵吸口开度、喷嘴角度、表面流速、循环压力等方面, 从而达到我们想要的逆流效果。在汽车制造等行业的涂装过程中, 前处理电泳工艺是至关重要的环节。然而, 传统的电泳工艺在环保和涂料利用率等方面存在一定的局限性。随着国家环保的要求日益严格和

企业对成本控制的重视, 逆流工艺在涂装车间前处理电泳线电泳工位的应用逐渐受到关注, 电泳逆流工艺将会在新工厂及旧工厂改造中得到越来越多的应用, 电泳逆流设计调试验证可以包含但不限于以上调整思路, 需要结合具体槽体结构进行具体分析。

参考文献:

- [1] 王浩昕, 王军, 施其龙. 电泳打磨常见过程质量缺陷及分析方法和控制策略[J]. 现代涂料与涂装, 2022(4): 40-42.
- [2] 任孝静, 占早华. 涂装电泳车身打磨点缺陷的排查与防控[J]. 现代涂料与涂装, 2023(6): 39-41.
- [3] 刘益阳. 阴极电泳涂装中漆膜常见的问题及解决措施[J]. 现代涂料与涂装, 2022(1): 45-48.
- [4] 高忠健. 浅谈涂装阴极电泳用整流电源原理[J]. 现代涂料与涂装, 2024(11): 67-69.
- [5] 张慧, 贾鹏鹏, 徐光耀. 浅谈乘用车防腐设计和预防[J]. 现代涂料与涂装, 2024(4): 59-62.
- [6] 王锡春. 涂装车间设计手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [7] 李天贺, 杨明恩, 华云, 等. 车身电泳颗粒控制管理[J]. 现代涂料与涂装, 2022(8): 48-50.



(上接第 62 页)膜的一次报交率, 进而减少打磨工位, 而铁粉、焊球等导致的颗粒缺陷又是电泳漆膜的主要缺陷之一, 因此前处理工艺对铁粉的去除效率至关重

要。本文简述了目前常用的除铁粉设备, 在实际应用中, 设备配置与工艺配置需共同考虑, 同时需要控制进入涂装车间的白车身质量, 才能有效降低电泳漆膜缺陷。

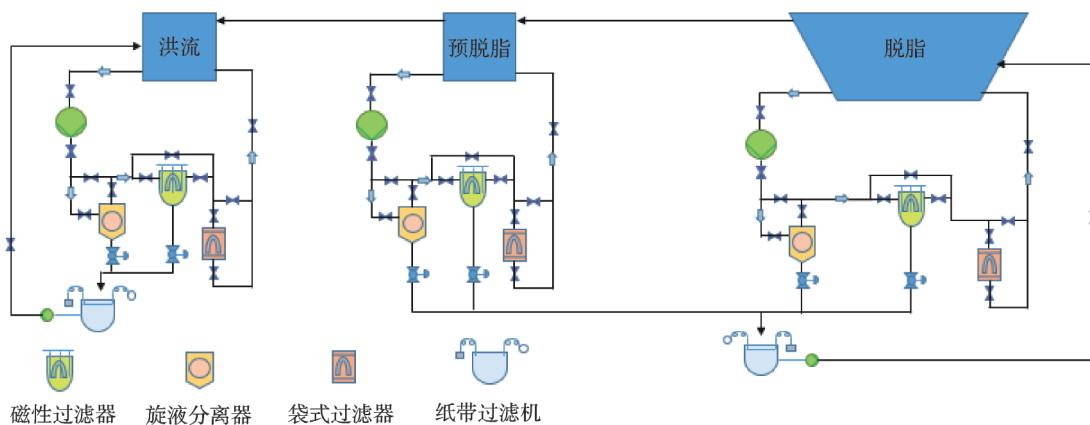


图3 常规轿车线脱脂段除铁粉配置

参考文献:

- [1] 徐国庆, 申标, 孙自松, 等. 实现“电泳零打磨”目标的改进措施[J]. 汽车工艺与材料, 2014(8): 51-54.
- [2] 林茂武. 汽车涂装前处理生产线常用的除铁粉设备[J]. 汽车工艺与材料, 2009(8): 30-31.
- [3] 余志刚. 浅谈实现电泳零打磨的措施[J]. 现代涂装与涂装, 2017(2): 43-45.