

# 关于车身铝合金门槛电泳烘干性提升的改善

张皖阳<sup>1</sup>, 李文鹏<sup>2</sup>, 刘永宏<sup>2</sup>, 赖云飞<sup>2</sup>, 刘浩<sup>2</sup>, 魏晓明<sup>1</sup>, 杨启光<sup>1</sup>, 鲍雪忠<sup>1</sup>

(1.吉利汽车集团有限公司,浙江 宁波 315000; 2.零跑科技股份有限公司,浙江 金华 321000)

**摘要:**电泳涂层的烘干性能的好坏,会直接影响车身的防腐、强度等性能指标,甚至影响整车寿命。本文就解决新车型在涂装试制过程中,车身铝合金门槛电泳漆膜烘干不良的问题进行深入验证及探究。利用人机料法环等手段,对问题进行分析、排查,锁定要因。在红外辐射烘干设备的辅助下,提升烘干室加热量。通过优化电泳烘干温度,调节热风循环方式等工艺手段,解决了因电泳烘干速率过快引发的一系列质量缺陷,同时也保证整个白车身受热均匀,所有区域均达到烘干条件。

**关键词:**铝合金门槛;电泳烘干;红外辐射;热风循环

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2026)01-0017-04

## Improvement of Electrophoretic Drying Performance of Aluminum Alloy Threshold for Car Body

ZHANG Wan-yang<sup>1</sup>, LI Wen-peng<sup>2</sup>, LIU Yong-hong<sup>2</sup>, LAI Yun-fei<sup>2</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>, WEI Xiao-ming<sup>1</sup>,  
YANG Qi-guang<sup>1</sup>, BAO Xue-zhong<sup>1</sup>

(1.Geely Auto Group Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China;

2.Leapmotor Technology Co., Ltd., Jinhua 321000, Zhejiang, China)

**Abstract:** The quality of the drying performance of electrophoretic coatings directly impacts performance indicators such as the anti-corrosion property and strength of the vehicle body, and may even influence the lifespan of the entire vehicle. This article conducts in-depth verification and exploration on the issue of poor drying of the electrophoretic paint film on the aluminum alloy door sills of the new model during the painting trial production process. Utilize human, machine, material, method, environment, and other means to analyze, investigate, and identify the root cause of the problem. With the assistance of infrared radiation drying equipment, enhance the heating capacity of the drying chamber. By optimizing the electrophoresis drying temperature and adjusting the hot air circulation method, a series of quality defects caused by the excessively fast electrophoresis drying rate were resolved. At the same time, it ensured that the entire body-in-white was evenly heated, with all areas meeting the drying conditions.

**Key words:** aluminum alloy threshold; electrophoretic drying; hot air circulation

## 0 引言

在涂装生产过程中,漆膜需经过高温烘烤才能完全固化。漆膜固化后的状态,直接影响车身的装饰效果及外观保护功能。在各涂层漆膜烘干过程中,电泳漆膜

固化是涂装的第一道烘干工序,温度最高且最为关键。俗话说“烂车先烂底”,车身钣金锈蚀一般都是底层的漆膜出现问题或遭到破坏,才会导致由内向外的锈蚀,所以说良好的电泳漆膜状态是车身防腐的前提。

近年来,新能源汽车发展势头正猛,相比燃油车,电车的整车重量增加(尤其纯电车型)。为此,如何给车身减重这一课题引得各大车企去探究。新能源汽车在轻量化材料选择上存在复杂的“技术-成本-制造”三角平衡,而铝材能在当前阶段成为主流选择。但铝合金

收稿日期:2024-06-06

作者简介:张皖阳(1993—),男,本科,助理工程师,主要从事新车型涂装工艺开发、涂装同步工程分析相关工作。E-mail:wanyang.zhang@geely.com。

和碳钢材质在物理性能上又存在着差异,使得涂装在新车型导入过程中,要充分考虑两种材料共线生产所带来的差异。我公司在某款新车型试制验证过程中,出现了铝合金门槛电泳漆膜烘干不良的现象,本文针对此问题,从材料、烘干设备、工艺参数等角度进行分析排查,并制定相应的解决措施及保障方案。

## 1 现状描述

电泳烘干是在高温烘烤的条件下,经过溶剂水分挥发、漆膜热熔化、涂层高温热固化3个过程,形成网状的架桥结构,从而赋予电泳漆的抗锈蚀性能。此试制车型在电泳车身经过烘干后,其外表面均已烘干透彻,但门槛区域存在漆膜烘干不良,部分还有电泳流痕的问题。门槛内侧及腔体的电泳漆膜还处于湿膜状态。

按照电泳漆材料供应商给定的现场漆膜烘干固化窗口,只要车身各部位均在烘干窗口范围内,就可达到烘干固化要求。我们可参照最低电泳烘干温度 165℃、烘烤时间 15 min,在新车型试制过线时,采用炉温仪

对车身各部位测试电泳炉温曲线,发现前地板烘干曲线实际大于 165℃的时间为 6.5 min,后纵梁烘干曲线大于 165℃的时间为 9.5 min,均不满足最低电泳烘干条件。

对铝合金门槛的电泳漆膜进行烘干性检测,先将检测处的漆膜表面清洁干净,无脏污。取直径 30 mm 的手工脱脂棉,蘸 MIBK 溶剂(甲基异丁基酮),在门槛部位进行同一方向反复擦拭,保证棉球与漆膜的接触时间约 3 min。观察棉球。若电泳漆膜固化不完全,会出现粘色现象,此时棉球上会出现污染,用手触摸车身电泳漆膜会出现划痕、失光现象。因此可以判定,当前烘干条件下,铝合金门槛部位电泳烘干性不满足质量要求。

## 2 电泳烘干不良原因

针对铝合金门槛部位电泳烘干不良,从人、机、料、法、环、测等维度进行剖析排查,确认各项是否符合要求,对不合格项进行判定,见图 1。

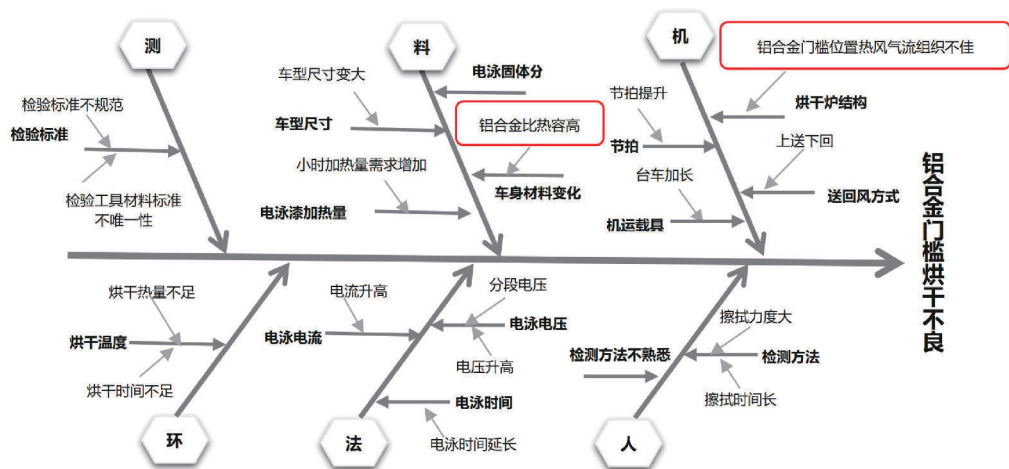


图 1 涂装因素判定结果

此条生产线共线生产 3 款车型,且车型尺寸相当,在相同的烘干条件下,其他车型电泳漆膜均正常固化,而新车型地板门槛区域测量点烘干曲线不符合烘干窗口要求。综合分析,此次新车型铝合金门槛的应用导致电泳漆膜交联固化不良。通过对每个模块的项目进行二次分析,并结合涂装产线上其他车型结构同步分析,最终锁定铝合金材料在门槛上的应用差异以及门槛区域热风气流组织不佳是此次铝合金门槛烘干不良的原因。根据末端因素,对这两项进行深入分析。

### 2.1 车身材料因素

根据热量计算公式  $\Delta Q=mc\Delta T$ , 铝合金的比热容 ( $0.88\times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ) 比碳钢 ( $0.46\times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ) 大,

在同等质量条件下,升高相同的温度,铝合金所需的热量比碳钢多,这就导致铝合金门槛区域在吸热后其自身升温速率比其他碳钢区域要低。

### 2.2 热风气流因素

该现场电泳烘干室采用侧送下回风的热风循环方式,对下部气流循环方式进行分析可知,由于回风口离车底很近,下部吹出的热风无法有效循环。通过验证及计算发现,在车身门槛高度不变的前提下,底部吹嘴角度设置为  $6^\circ$  时,吹扫高度比例最大为 40%(见表 1)。虽然这种对流循环方式的优点是烘干室不易起灰,保证了烘干室内的洁净度,但最底部热风会被抽走约 8%,达不到规定的烘烤温度和时间的要求,从而造成局部

烘烤不良,降低热量利用率。

表 1 底部吹嘴吹扫状态

项目	底部吹嘴角度/(°)		
	0	6	12
可吹扫门槛高度/mm	32	70	0
门槛总高度/mm	175	175	175
吹扫高度比例/%	18	40	0

### 3 验证措施及改善方案

针对以上分析出的末端因素,需要对现场的电泳烘干室体结构进行适应性改造,用以应对车身铝合金门槛新材料的加热量需求。同时制定相应的验证措施,对烘烤温度、风向等工艺参数重新优化调整。

#### 3.1 增加红外辐射系统

由于车身材料的应用变化,整个白车身对加热量的需求也随之增加。在保证生产节拍不变的前提下,需要对电泳烘干室体进行改造。在电泳烘干的上坡段,依据白车身轮廓仿形,在侧面增加红外辐射烘干系统(见图 2)。

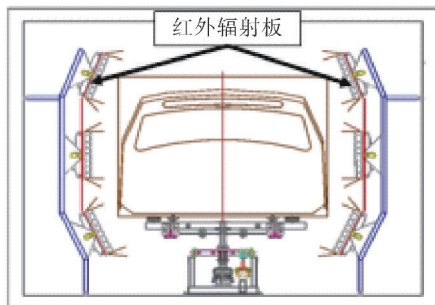


图 2 红外辐射系统布局

红外辐射又称预混燃烧红外加热技术,其原理是先通过电加热方式,给红外辐射板内催化棉传导升温,到系统设定的时间后自动断电;随后燃气进入红外板背面的波纹软管,并与周围大气中的氧气进行氧化反应。产生的热量会导致催化体表面温度升高,进一步将热量转化成红外辐射能量。这种燃气氧化反应的能量转换结果是绝大多数以红外线的方式辐射出去,其中以中波红外线最多,伴以少量短波和长波红外线。产生的中波只加热涂料中的羧基与羟基分子,对于没有涂层的金属、木材以及空气则没有明显的加热效果。其燃烧过程无有害气体(CO、NO 等)产生,化学反应式为: Gas(燃气)+Oxygen(氧气)+Platinum Catalyst(铂催化剂)=CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+IR heat(红外热能)。

红外辐射的应用优点:1)各辐射板可独立控制温度。辐射板分上下独立控制,保证上下温差均匀;

每 4 块辐射板需采用脉冲阀进行单独控制流量,方便调整区域温度,每块辐射板配一个手动球阀,辐射板故障时可以关闭;2)红外板产生的余热也散发在炉顶,把这块余热利用起来,配上搅拌风机,形成红外+热风的加热方式,加热效果更快,更节能,炉温更均匀;3)红外加热系统采用 PLC 控制单元,具备安全联锁及检测、自动吹扫、自动加热、全程辐射板温度检测、故障切断报警等功能,同时配置电能表,方便统计能耗。

#### 3.2 烘烤温度验证

对烘干室内的红外辐射加热系统进行梯度设置辐射温度,提高车身烘干升温速率。利用对比法,设置两组升温段及保温段参数,用来验证上车身和下车身门槛烘干状态是否满足性能要求。

1)对电泳烘干室的工艺温度保持不变,红外辐射板温度按 20 °C 梯度设置进行验证,当设置至 140 °C 时,上车身烘干干性检测合格,下车身门槛烘干干性检测不合格,见表 2。

表 2 梯度设置辐射温度车身烘干状态

项目	辐射温度设置/°C				
	80	100	120	140	160
升温段温度设置/°C	180				
保温段温度设置/°C	190				
上车身烘干性	3 级	3 级	4 级	5 级	5 级
	不合格	不合格	不合格	合格	合格
门槛烘干性	2 级	2 级	3 级	3 级	4 级
	不合格	不合格	不合格	不合格	不合格

2)在第一组升温段与保温段温度参数基础上,分别各提升 10 °C,红外辐射板温度仍按 20 °C 梯度递增设置进行验证,验证结果发现,上车身和门槛在 140 °C 时,烘干干性检测等级均合格,但上车身出现过烘烤黄变和缩孔问题,见表 3。

表 3 提升工艺温度车身烘干状态

项目	辐射温度设置/°C				
	80	100	120	140	160
升温段温度设置/°C	180→190				
保温段温度设置/°C	190→200				
上车身烘干性	3 级	3 级	4 级	5 级	5 级
	不合格	不合格	不合格	合格(烤黄)	合格(烤黄)
门槛烘干性	2 级	2 级	3 级	5 级	5 级
	不合格	不合格	不合格	合格	合格

针对上述质量问题进行原因推测:1)红外辐射系统所有红外板温度设定一致,没有结合车身炉温曲线进行调整,虽然车身整体烘干加热量增加,但还是没有解决下车身门槛烘干速率比上车身慢的根本问题,导致下车身门槛刚达到烘干性能要求时,上车身已经出现了过烘烤问题;2)烘干室升温段增加红外系统后,由于温度提升速率过快,这样导致车身空腔及焊缝中夹存的油污残液等迅速沸腾,飞溅至车身外表面形成电泳缩孔及流痕。

解决措施:1)由于上车身无需增加过多的热量,可适当降低上车身的红外辐射加热温度,重点针对车身上部门槛区域进行温度提升调整,用以改善下车身门槛烘干速率比上车身慢的问题;2)根据烘干室内实车的位置,调整烘干室所有热风喷嘴的方向。下部风嘴方向全部朝向车底部门槛,烘干室体两侧热风吹嘴的角度依据车轮轮廓调整,优化热风循环,避免温度提升过快导致的质量缺陷。

### 3.3 改善底部热风循环方式 & 优化烘烤温度

1)由风机将室外环境温度的空气经过进风管、过滤器抽进强冷室。在烘干室底部,输送链两侧布置铝制旋压的方向可调的吹风嘴,吹风嘴风速为 20 m/s 左右。吹风嘴离车体表面距离不小于 300 mm。在对着铝合金门槛及底板部位进行吹扫的同时,调整回风插板,可以减少回风口所占的烘干室面积,避免热风吹嘴吹出的热风还未彻底循环至底板就被回风口给抽走,最终要满足下车身铝合金门槛内外结构的加热量。

2)根据白车身的轮廓仿形,调整侧面中上部的热风吹嘴的吹扫角度,将热风吹至车仓内部,使热风“定向”穿透死角和遮蔽区(如车身内表面,钣金内部腔体等),达到所有需要涂层的表面,能够有效从内向外加热循环(见图3)。

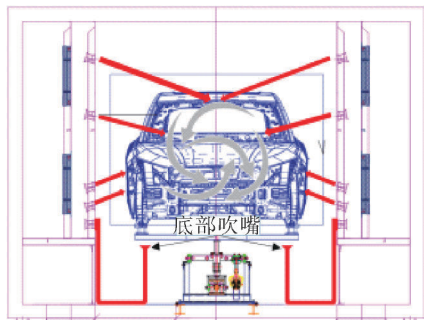


图3 改善后热风吹嘴状态

3)优化红外辐射板开启的数量及温度。关闭中上部红外加热辐射板,保留下车身门槛仿形辐射功能,观察白车身烘干效果及质量状态。通过对车身烘烤温度

的验证,当红外辐射系统温度设定 140 ℃时,顶部温度显示达到 90 ℃。利用炉温仪对车身温度变化进行监控,所有区域温度均达到最低烘干条件,满足电泳材料厂家提供的烘烤窗口。同时,车身缩孔缺陷得到有效抑制,且上车身无烘烤黄变现象,问题得到有效解决。

### 4 验证结论

通过此次问题的解决,我们可以总结出以下几点:

1)后面需重点落实三检制度,针对开班后、生产中及收班前的车辆随机进行烘干性和附着力的检查和确认,由实验室化验员按要求进行电泳车身性能检测,取样并记录数据。生产过程中发现异常及时上报工艺员。

2)对于此次红外辐射烘干系统的案例应用,可以有效提升整体烘房的烘干加热量。且红外辐射设置独立可控系统,根据车身不同区域,不同材料的物理特性所需求的热量进行调整;结合热风吹嘴的角度调整,使得白车身各部位受热均匀。合理开关红外辐射板温度及数量,对燃气能源的消耗量控制也有所帮助。

3)车身的烘干速率不宜过快,要结合产线烘干温度及时间进行梯度优化调整,否则就会产生批量烘烤变黄及缩孔等质量缺陷。

4)将此次案例纳入历史经验库,后期对于新建线烘房设计,要考虑车身铝材料的特性及应用比例,电泳烘干室相应的烘干加热预留余量也应放大,确保热量满足白车身需求。

### 5 结语

车身铝合金门槛电泳烘干工艺的提升,是汽车制造轻量化与电泳涂装高质量发展的关键交汇点。通过红外辐射烘干系统的案例应用、烘干速率调整,有效地解决了门槛烘干性不良的问题。在实践层面,优化后的烘干系统与前处理电泳工艺形成闭环控制,通过在线监测技术实时反馈涂层厚度与固化状态,使产品一次合格率稳定在 99.2%以上,返修成本下降 32%。课题成果验证了其跨车型、多材料的兼容性,为铝合金车身大规模产业化提供了可靠的技术路径。面向未来,随着新能源汽车对轻量化与防腐性能的双重需求加剧,铝合金门槛电泳烘干工艺需进一步融合智能传感与数字孪生技术,构建预测性维护体系。铝合金电泳工艺将向“自感知-自优化”方向演进,推动涂装行业向高效、零缺陷、可持续制造模式转型。

### 参考文献:

- [1] 李晓琳,那汶平.浅谈全铝车身烘干系统设计及应用[J].现代涂料与涂装,2020,23(3):52-54.

(下转第 64 页)