

电泳槽生菌带来质量问题的分析与解决

李健航, 曲明明

(一汽解放汽车有限公司, 长春 130011)

摘要: 本文简述了一次汽车涂装生产线因电泳槽体发生微生物污染, 导致车身电泳漆膜出现明显质量问题的过程。通过对漆膜缺陷形态的细致观察, 结合电泳工艺原理进行理论研判, 并对槽液进行取样检测与分析, 最终确定微生物大量繁殖是根本原因。基于该结论, 现场通过有针对性地调整槽液 pH 至适宜范围, 并投加电泳专用杀菌剂, 有效抑制了菌体生长, 彻底消除了漆膜异常问题。本次处理过程表明, 电泳槽液的微生物控制是保证涂装质量的重要环节, 本文也为类似质量问题提供了明确的解决思路。

关键词: 汽车涂装; 电泳; 问题解决

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)11-0068-05

Analysis and Solution of Quality Problems Caused by Bacterial Growth in Electrophoresis Tanks

LI Jian-hang, QU Ming-ming

(FAW Jiefang Automobile Co., Ltd., Changchun 130011, China)

Abstract: This article briefly describes the process of a car painting production line where microbial contamination occurred in the electrophoresis tank, resulting in significant quality issues with the electrophoretic paint film on the vehicle body. Through careful observation of the morphology of paint film defects, theoretical analysis based on the principle of electrophoresis technology, and sampling, testing, and analysis of the tank solution, it was ultimately determined that the root cause was the proliferation of microorganisms. Based on this conclusion, targeted adjustment of the pH value of the tank solution to a suitable range and the addition of electrophoresis specific bactericides on site effectively inhibited bacterial growth and completely eliminated the problem of abnormal paint film. This processing indicates that microbial control of electrophoresis bath solution is an important link to ensure coating quality, and this article also provides clear solutions for similar quality problems.

Key words: automotive painting; electrophoresis; problem-solving

0 引言

电泳是汽车涂装过程中的关键环节, 其涂装质量直接决定了车身的防腐性能与耐候性能, 是保障整车使用寿命和安全的基础。电泳层作为底涂层, 不仅为后续中涂涂层、面漆涂层提供良好的附着基底, 其自身的

均匀性、致密性与完整性也直接影响最终涂膜的外观和性能。若电泳质量出现严重弊病, 如膜厚不均、颗粒、缩孔等缺陷, 不仅会降低车身整体防腐蚀能力, 还会导致面漆出现外观不良, 甚至造成批量返工, 大幅增加生产成本。

电泳槽微生物污染引发的质量问题, 往往表现为大面积、突发性的漆膜异常, 如菌斑、气泡且附着不均, 极易导致连续批量质量问题。一旦发生, 若不迅速识别和处理, 极易蔓延至整个电泳系统, 可能造成生产线停线, 严重者甚至会导致整个电泳槽体中电泳漆的报废,

收稿日期: 2024-06-13

作者简介: 李健航(1999—), 女, 本科, 助理工程师, 主要从事汽车涂装工艺设计与管理工作。E-mail: lijianhang@fawjiefang.com.cn。

影响生产节拍与企业效益。因此,系统性地预防电泳槽体微生物孳生,并在问题爆发后能够快速诊断、有效控制并恢复生产,已成为涂装工艺管理与技术团队的重要职责。

1 电泳槽微生物污染的快速爆发与初步识别

电泳槽微生物孳生的速度往往是爆发式的,在短时间内即可导致槽液体系失衡并引发严重漆膜缺陷。由于大多数汽车制造企业并不配备专业的实时微生物检测设备,工艺工程师通常需要依赖对现场多重迹象的综合观察与关键参数监测,以快速判断是否存在细菌污染问题。系统、准确地识别这些特征,成为控制污染蔓延、减少质量损失的首要环节。

1.1 漆膜状态的视觉诊断与微观分析

判断电泳槽是否发生微生物污染,最直观有效的方法是系统观察车身在电泳烘干前后的漆膜状态。在出电泳槽后、进入烘干炉前的湿膜状态下,若漆膜表面已出现大量细密、呈聚集分布的气泡(见图1),且这些气泡随车身上液体流动,呈现不均匀的“堆积”形态,就应高度警惕微生物污染的可能。



图1 电泳膜状态下出现的堆积型细小气泡

进行电泳烘干工序之后,若这些气泡未能通过流平过程逸出或消除,仍保留在干膜中,且经初步打磨后观察发现气泡为“空心”结构(即气泡底层已穿透至金属基材附近),则基本可断定问题源于电泳槽液的微生物污染。为进一步确认,常使用小型号砂纸(如240目至400目)对缺陷部位进行重度打磨。若打磨至电泳漆膜完全移除、露出钣金基材后,气泡痕迹才彻底消失,说明气泡并非表面污染所致,而是产生于电泳沉积过程中,与菌体附着及水分挥发直接相关(见图2)。这种深层空心气泡与普通因表面污染引起的气泡有本质区别。后者通常位置较浅且不呈现堆积状态,可通过轻度打磨消除,而前者根植于电泳漆膜深层,是微生物污染的典型特征。

这类缺陷因其位置深、结构特殊,无法通过常规打磨或返修消除,一旦发生极易导致整批次车身需重度打磨,甚至报废,造成严重的物料与工时损失。



图2 经重度打磨后仍可见的空心气泡痕迹

1.2 关键槽液参数的异常变动趋势

除漆膜状态外,电泳槽及超滤(UF)系统关键参数的异常变化也是判断微生物污染的重要依据,需重点监测的参数包括电泳槽液 pH、MEQ(电导率当量)以及 UF 液的 pH。

微生物污染最典型的表现是电泳槽液 pH 在短期内急剧上升。例如某生产线 pH 标准控制范围设定为 6.1 ± 0.5 ,若检测发现 pH 迅速升高至 6.6 甚至更高,且无其他明显原因(如补加药剂产生偏差、中和剂异常等),则应优先考虑微生物大量繁殖的可能性。某些特定的嗜酸或耐酸微生物在代谢过程中,会分解电泳槽液中的有机成分(如树脂、溶剂等)作为碳源和能源,这一过程常伴随酸性物质的消耗或碱性代谢产物的生成,从而导致体系 pH 反常升高。细菌代谢过程中往往会消耗系统中的氢离子或有机酸成分,从而引起 pH 的显著上升。

以某次实际发生过的生产线污染事件为例(见图3),在细菌爆发初期,MEQ 也出现明显下降,这一变化虽可辅助判断污染,但其响应往往滞后于漆膜问题的出现。因此,实时高频监测 pH 变化,能够在质量问题大规模发生前为工程师争取宝贵的应对时间。

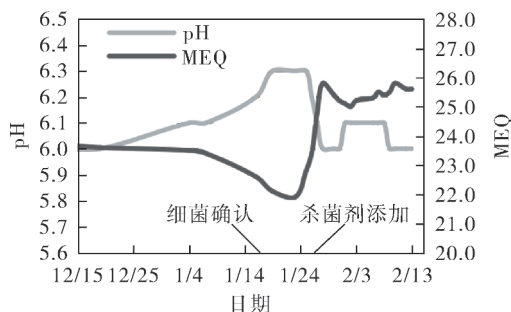


图3 某电泳生产线微生物污染期间槽液pH与MEQ变化趋势

此外,超滤系统(UF)作为电泳后清洗与槽液稳定的关键环节,其槽液 pH 也会因微生物污染而同步上升。在电泳涂装工艺中,通常采用超滤技术实现电泳后的 UF2→UF1→ED 回收清洗方式,提高涂料利用率,减少涂装用水量并降低污水排放量,通过超滤液(UF

液)排放并补加纯水控制电泳工作液参数稳定从而提高电泳漆膜质量^[1]。因UF液通常循环使用的特性,一旦发生细菌交叉污染,极易成为二次污染源。因此,UF液的pH监测不应被忽视,而应作为电泳槽微生物防控体系中的重要组成部分。UF槽液的pH也是判断电泳槽生菌的重要依据。

1.3 设备状态的异常表现

微生物污染还会在设备层面表现出明显异常。由于某些菌种在生长过程中会产生菌丝或生物膜,这些物质可导致超滤膜堵塞、阳极管流通不畅,以及循环泵流量下降等问题。若检测发现超滤通量显著降低、反洗频率异常增加,或阳极系统电流波动加大,且伴随上述漆膜与参数异常,则进一步印证微生物污染的存在。生物膜的形成是一个动态过程,其分泌的胞外聚合物(EPS)具有极强的黏附性,不仅造成物理堵塞,还可能包裹菌体,使其对杀菌剂产生更强的耐受性,增加治理难度。

2 微生物污染导致漆膜气泡的形成机理与诱因分析

观察本次电泳漆膜气泡,这种空心气泡外观特殊,呈现聚集且深层的特点,无法通过表层打磨而消除,必须使用抛光机和小型号砂纸(一般先采用240目型号砂纸再采用400目型号砂纸)进行重度打磨,否则在喷涂中涂层、面涂层后会出现大面积的空心小气泡,造成防腐和外观质量的不合格。结合这种特有缺陷外观和电泳槽液pH迅速升高的情况判断,气泡是由电泳槽液生菌造成的。其产生机理与电泳沉积过程、细菌生物学特性密切相关,而污染源的出现则源于系统多个环节的管控疏漏。

2.1 槽液生菌产生电泳气泡的原理

前处理电泳线体的细菌含量一般大于 1.0×10^3 个/mL,车身就会吸附大面积的细菌尸体,细菌含水量大,为74%~84%,通过电泳、电泳烘干后,菌尸中大量水蒸气蒸发,涨破已表干的电泳漆膜,从漆膜内层出现空心气泡^[2]。在电泳沉积阶段,带负电的细菌细胞或菌尸会随同带负电的电泳漆颗粒一同向阳极(车身)移动。由于菌体尺寸相对较大,其在漆膜中的分布是不均匀的,容易形成局部聚集。

电泳工序分为4个过程:电解→电泳→电沉积→电渗。电解:水在通电时涂料粒子在电场的作用下向阴极移动。电沉积:涂料粒子在电极上沉积析出现象。电渗:在电场的作用下,涂膜内部所含的水分渗析出来而移向槽液,使涂膜脱水。

阳极(电极)氧化反应: $2\text{H}_2\text{O}-4\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}^++\text{O}_2 \uparrow$, 阴极(被涂物)还原反应: $2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-+\text{H}_2 \uparrow$ ^[3]。

在正常电泳过程中,车身表面(阴极)会产生氢气,随着循环逸出,电沉积的湿膜会呈现一定数量的致密小孔,在电泳烘干过程中,通过流平、固化得到正常涂膜。而电泳漆生菌后,细菌为嗜酸菌,嗜酸菌侵蚀槽液中的氢离子,导致槽液pH升高,与氢离子结合的树脂逐渐释放,树脂沉淀,凝聚在车体表面,影响车体表面氢气逸出。更关键的是,大量细菌尸体及其代谢产物混杂在沉积的漆膜中,破坏了漆膜的连续性和致密性。在烘烤过程中,菌体内部包裹的水分急剧汽化产生高压蒸气,而此时外层漆膜已开始交联固化,弹性下降,无法有效释放内部压力,最终被撑破形成独特的“空心”气泡结构。研究表明,电泳工艺参数(如电压、时间)的异常波动会加剧漆膜沉积的不稳定性,为细菌残留创造条件^[4]。电沉积过程中涂料不均匀,涂料同时与菌尸混合,附着于车身表面,最终导致车身涂膜沉积聚集性深层气泡是产生气泡的根本原理。

2.2 电泳系统微生物污染的主要来源

涂装车间前处理和电泳系统管路错综复杂,槽体与槽体间液体流向复杂,除此之外还存在汽车室体向后序兜液的情况,系统和管路中的细菌一旦孳生,容易相互传染,下面对导致电泳槽体生菌的所有可能原因进行逐个分析。

电泳原漆添加剂浓度高、新鲜度高,不易孳生细菌。电泳槽液固体分较高且含有一定量的溶剂、重金属离子,本身不易孳生细菌。然而,一旦有外源性细菌引入,并找到合适的生存区(如低流速区域、温度适宜区域),部分耐受型菌株仍可以适应并繁殖。另外需要注意电泳槽液的稳定性是长期防控的基础,有研究指出新型高泳透力电泳漆在与传统电泳漆混槽时,需重点关注其工艺参数与配套性,以免引入不可控风险^[5]。

电泳工序后的二道或三道UF水洗固体含量很低,槽液流动性小,其中的超滤系统易孳生细菌,细菌堵塞超滤管路,容易形成恶性循环。UF系统长期运行后,膜表面及管路内壁极易形成生物膜,这种膜状菌群结构对常规杀菌剂具有极强抵抗能力,是反复污染的根本原因之一。

制纯水系统是容易被忽视的环节,因为电泳系统所加的水都来源于纯水系统,如果加入的纯水中带有细菌源,细菌将会容易孳生。其中尤其是纯水贮槽,其连接管路因时常处于静止状态,易孳生细菌。另外,需要关注车间外网来水的细菌含量,一旦外网来水细菌含量高,制纯水环节中,砂滤罐、碳滤罐、膜管以及过程中的管路中都会容易感染顽固细菌且不易杀死。纯水因其低离子含量,对微生物的抑制作用较弱,反而成为某些寡营养微生物的理想生长环境。砂滤罐、碳滤罐除

了日常的反洗杀菌,也可以定期更换石英砂、活性炭。膜管可以采用低氧化性的高浓度异噻唑啉酮杀菌剂清洗,高氧化性杀菌剂对膜管有损伤,会降低膜管寿命。

电泳前最后一道纯水洗与电泳槽联系密切,如孳生细菌,将随每台车携带的液体进入电泳槽,且槽液固体分低,水源完全来自纯水系统,易联合孳生细菌。磷化后至电泳前的水洗工序过多,也容易造成细菌孳生。

外界环境、天气、温湿度等对电泳槽液孳生细菌影响很大,细菌往往在湿润、不流动、温度适宜的环境中孳生。在气温迅速上升的假期需要格外关注电泳槽细菌含量,可以一次性加入一定浓度的杀菌剂,防止细菌爆发。季节性变化,特别是春夏之交温湿度升高,为微生物繁殖提供了最佳条件,此时应加强监测和预防性杀菌。

3 系统性排查与有效治理措施

3.1 电泳电压影响排除试验

为确认电压是否为气泡缺陷的影响因子,在保持槽液 pH、电泳时间等参数不变的条件下,分别采用不同电压进行样板试验。类似的工艺研究指出,通过响应面试验设计等方法系统分析电泳电压、时间等参数对漆膜性能的影响,是定位关键因子的有效途径^[6]。电泳电压影响试验结果见表 1,在不同电压下漆膜气泡缺陷的状态未见显著差异,表明电压并非本次污染事件中气泡产生的主要影响因素。该步骤至关重要,它排除了电参数扰动的可能性,将问题焦点集中到槽液本身的性质变化上。

表 1 不同电压下的泳板试验数据

| 时刻 | pH | 电泳时长/s | 电泳电压/V | 样板效果 |
|-------|------|--------|--------|------|
| 18:20 | 6.68 | 180 | 220 | 气泡严重 |
| 18:30 | 6.68 | 180 | 210 | 气泡严重 |
| 18:40 | 6.68 | 180 | 200 | 气泡严重 |
| 18:50 | 6.68 | 180 | 190 | 气泡严重 |

3.2 电泳槽液 pH 影响验证试验

第二阶段验证电泳槽液 pH 对气泡的影响。18:50 时,取样现场电泳槽液 10 L,测量槽液的初始 pH 为 6.35,加入 35 mL 酸性中和剂,每搅拌 10 min,测量槽液 pH,并泳板检验效果。19:30 时,新取样现场电泳槽液 10 L,测量槽液的初始 pH 为 6.18,加入 15 mL 酸性中和剂,每搅拌 10 min,测量槽液 pH,并泳板检验效果,具体数据见表 2。

试验结果表明:随着 pH 的降低,漆膜表面气泡数量显著减少,缺陷严重程度明显改善。这说明降低槽液

pH 可有效抑制细菌活性或减弱其负面影响,是改善漆膜质量的关键可控因素。

表 2 不同 pH 下的泳板试验数据

| 序号 | 时刻 | pH | 操作 | 样板效果 |
|----|--------------|------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | 18:50 取槽液 | 6.35 | 加入 35 mL 酸性中和剂搅拌 10 min | 比 pH 为 6.68 时好转,依旧有气泡 |
| | 19:00 | 5.68 | 180 s, 200 V 泳板 | |
| 2 | 19:30 取槽液 | 6.18 | 加入 15 mL 酸性中和剂搅拌 10 min | 有气泡 |
| | 19:40 | 5.83 | 180 s, 200 V 泳板 | |
| | 19:50 | 5.72 | 180 s, 200 V 泳板 | |
| | 20:00 | 5.66 | 180 s, 200 V 泳板 | |

3.3 临界 pH 控制范围的确定

在明确 pH 的影响后,需进一步确定槽液 pH 的控制范围。补加酸性中和剂(20%含量)1 890 kg,持续测量槽液 pH,并过车验证,具体数据见表 3。

表 3 不同 pH 下的车身状态

| 序号 | 时刻 | pH | 操作 | 效果 |
|----|-----------|------|--------|----------|
| 1 | 22:06 取槽液 | 5.67 | | |
| | 22:19 | 5.59 | | |
| | 22:55 | 5.65 | | |
| 2 | 23:30 取槽液 | 5.61 | 过车 5 台 | 5 台车漆膜正常 |
| 3 | 00:11 取槽液 | 5.74 | 过车 2 台 | 2 台车漆膜正常 |

所以 pH 在 5.61~5.74 之间可以解决生菌带来的气泡问题。并对电泳区 pH 的监控频次提升至 1 次/h,实时检测 pH 处于稳定状态。确定此临界控制窗口具有重要实践意义。pH 过低可能影响电泳漆的稳定性、沉积效率乃至漆膜本身性能(如膜厚、耐腐蚀性),pH 过高则无法有效控制因细菌导致的缺陷。找到这个平衡点是实现有效可持续生产的关键。

3.4 杀菌剂的合理选择与应用

针对现场电泳槽体细菌爆发的现象,需要选择合适的杀菌手段。本次细菌爆发选择异噻唑啉酮杀菌剂,采用在电泳槽液中添加杀菌剂开启循环同时过滤菌尸的方式。异噻唑啉酮类杀菌剂通过破坏微生物的细胞膜和抑制酶活性来杀死细菌^[7],具有广谱、高效的特性,且对电泳漆体系相对兼容。

对电泳槽液分 3 次添加共计 275 kg 杀菌剂,循环 24 h,同时过滤菌尸,持续观察电泳槽液 pH,无继续上升趋势,判断细菌已被控制住。分次投加有助于维持杀菌剂浓度,避免单次高浓度冲击对电泳槽液产生的不

利影响,同时配合物理过滤去除被杀死的菌体,防止其分解产物产生二次污染。

值得注意的是细菌存在耐药性,需要采用异噻唑啉酮杀菌剂、双氧水杀菌剂等两种以上杀菌剂,定期交替使用,防止细菌产生耐药性后再加入杀菌剂后没有杀菌效果,且杀菌操作应延伸至 UF 系统、纯水系统等全流程,才能实现长期有效控制。建立槽体轮换杀菌机制,是微生物控制的长效策略,可针对不同作用机理,防止特定菌群形成优势种群。对全系统进行同步杀菌是根治措施,避免任何死角成为再次污染的源头。

4 结语

电泳作为汽车涂装过程中的核心环节,是车身的“打底工艺”,其质量直接决定了整车的防腐蚀性能与涂层附着力,是保障车身长期耐久性和外观质量的基础。电泳槽液微生物污染在实际生产中虽属低概率事件,但一旦发生,极易引发槽液稳定性崩溃、漆膜出现批量性缺陷,甚至可能导致槽液永久失效和生产线长期停摆,造成重大经济损失。

本文结合漆膜缺陷分析、槽液参数监测和设备状态观察,建立起一套电泳槽微生物污染的快速诊断策略。正如相关研究所述,对电泳流痕、缩孔等常见缺陷的系统分析是建构全面质量问题库的重要组成部分^[8]。通过试验验证锁定 pH 为核心控制因子,并将 pH 降至 5.61~5.74,结合杀菌剂添加和菌尸过滤,成功解决了因生菌导致的大批量漆膜气泡问题,实现缺陷车辆 100%至 0 的突破。

本次事件的处理经验凸显了建立系统化、前瞻性微生物防控体系的重要性。它不仅包括文中阐述的快速诊断和应急处理流程,还对操作人员和维护团队进行定期培训,提升其识别早期迹象的能力具有重要意

义。从长远来看,电泳涂装系统的微生物控制应从事后补救转向事前预防。建议企业建立包括定期杀菌、系统清洗、关键参数高频监测以及纯水系统卫生管理在内的全方位防控体系,特别是将 UF 系统反渗透膜、纯水储罐等高风险区域的清洁度和生物膜控制纳入常规预防性维护计划,并利用停产间隙进行彻底的系统消毒。尤其在季节更替及停产期前后加强预防性杀菌,才能最大限度避免因微生物污染导致的生产中断与质量损失,保障涂装生产的高效与稳定。通过技术手段与管理流程的紧密结合,构建一道坚实的防线,确保电泳这一基础工艺的稳定可靠,为整车质量保驾护航。

参考文献:

- [1] 李双杰,李金伟.电泳涂装超滤液组分分析及应用探究[J].现代涂料与涂装,2023(7):37-40.
- [2] 赵志明,苑智广.关于涂装前处理电泳生菌问题的解决[J].现代涂料与涂装,2022(3):62-65.
- [3] 代诗环,王鹏,郭常臻,等.汽车涂装前处理电泳的工艺参数分析[J].现代涂料与涂装,2021(1):30-32.
- [4] 周子鹤,涂伟萍,陈焕钦.环氧-丙烯酸阴极电泳涂料实验研究(II)——电泳涂装过程探讨[J].化学工业与工程,2001(4):205-209.
- [5] 吴贵生,邢汶平,吴吉霞.高泳透力阴极电泳漆混槽可行性试验研究[J].汽车实用技术,2017(10):209-211.
- [6] 陈龙富,罗立善,罗竹青,等.基于响应面实验设计的电泳工艺研究[J].湖南工业大学学报,2019(4):59-65.
- [7] 杭青.杀菌剂异噻唑啉酮在延安炼油厂循环冷却水系统中的应用[J].石化技术,2025(3):4-6.
- [8] 李梁,王磊.车身电泳流痕产生原因分析与防治[J].涂料工业,2020(4):76-80. ◆

(上接第 40 页)

- [8] SANDOVAL R, BELL T, HIBBEN M.Exterior durability in all-acrylic architectural gloss coatings: gloss retention and dirt-pickup resistance[C].Proceedings of the annual international waterborne,high-solids,and powder coatings symposium,2017,44:49-58.
- [9] RAGUNATHAN K, THAKKAR P.Novel acrylic polymer for architectural exterior paint and primer in one coatings applications[J].Coatings Technology,2018,15(2): 30-37.
- [10] ZHANG X, SHI F, NIU J, et al.Super hydrophobic surfaces: from structural control to functional application[J].Journal of Materials Chemistry,2008,18(6):621-633.
- [11] LI Z, GUO Z.BIOINSPIRED surfaces with wettability for an-

tifouling application [J].Nanoscale,2019,11:22636-22663.

- [12] 轻贺英人,上村茂人,仲居浩史,等.防污染涂料组合物: CN1105759C[P].1997-11-20.
- [13] ZHANG L, LI R, DING H, et al.Preparation of a self-cleaning TiO₂-SiO₂/PFDTS coating with superamphiphobicity and photocatalytic performance [J].Progress in Organic Coatings, 2024,197:108767.
- [14] 张旭,刘景新,王小梅.一种水基超疏水涂料及其制备方法: CN108893052B[P].2018-5-24.
- [15] BEAUGENDRE A, DEGOUTIN S, BELLAYER S,et al.Self-stratifying coatings:a review[J].Progress in Organic Coatings, 2017,110:210-241. ◆