

# 阴极电泳阳极膜破损排查方法

姜伟伟, 陈进方, 唐晓玲

(南京汽车集团有限公司, 南京 210000)

**摘要:** 主要介绍了阳极隔膜破损后的常见现象及常规排查方法, 并结合工程实践, 创新提出基于液位趋势变化的动态检测方法, 通过对比传统观察法、参数监测法的局限性, 形成了一套高效、精准的排查流程。详细阐述了从问题发现到根本解决的完整技术路径, 总结了多技术协同应用的经验, 为电泳系统稳定性管理提供了理论与实践指导, 对现场阳极系统及电泳系统的管理有较高的借鉴意义。

**关键词:** 阳极系统; 阳极膜破损; 排查方法

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)07-0061-04

## Investigation Method of Cathodic Electrophoresis Anode Film Damage

JIANG Wei-wei, CHEN Jin-fang, TANG Xiao-ling

(Nanjing Automobile Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** This article introduces in detail the common phenomenon of anode diaphragm damage and conventional inspection methods, and combined with engineering practice. By comparing the limitations of traditional observation method and parameter monitoring method, formed a set of efficient and accurate investigation process. In this paper, the complete technical path from problem discovery to fundamental solution is described in detail, and the experience of multi-technology collaborative application is summarized. It provides theoretical and practical guidance for the stability management of electrophoresis system, and has a high reference significance for the management of field anode system and electrophoresis system.

**Key words:** anode system; damaged anode membrane; troubleshooting methods

### 0 引言

2023年4月中旬, 我公司现场出现电泳槽液位异常升高的情况, 电泳槽液位检测设备频繁报警。经调查, 对比之前无异常升高的电泳液位, 问题发生后电泳液位每班都有约10 mm的提升。同时现场对工艺常规项目进行了复排: 1) 电泳液位监控设备状态正常; 2) 阳极液电导率及浊度均为正常状态, 目视检查阳极液清澈透明, 无电泳漆泄漏现象; 3) 电泳加料系统及管路状态无异常; 4) 槽液补水装置及阀门状态无异常; 5) 循环泵、喷淋泵管路、超滤系统及轴封系统无异常。综合以

上常规项目排查, 均无异常, 无法短时间确定液位升高的根本原因, 现场采取了临时措施: 电泳槽液位报警时, 对电泳后UF3槽液进行排放, 根据异常升高量估算, 每班排放槽液体积约1 m<sup>3</sup>。

槽液的排放会损失电泳漆中的小分子物质, 长期的累积排放, 会严重影响整个电泳系统的工艺平衡, 还会引起车身电泳漆膜质量的风险(如膜厚不均、耐腐蚀性降低), 增加现场工艺控制的难度; 同时长期槽液排放, 也增加了污水处理的负担。故需尽快对整个电泳系统进行排查, 发现导致电泳槽液位异常升高的原因, 将问题从根本上进行解决。

### 1 原因分析

现场从人、机、料、法、环、测6个方面对整个电泳系统进行排查, 梳理了可能会导致电泳槽液位升高的因素, 如表1所列。经过排查, 发现阳极槽液在正常生

收稿日期: 2024-03-06

作者简介: 姜伟伟(1986—), 女, 本科, 工程师, 主要从事前处理电泳相关工艺指导书与技术文件的编制、修订与完善工作。

E-mail: jiangweiwei@saicmotor.com。

产循环过程中,液位有快速下降现象,查看阳极循环系统除阳极以外的循环管路,无滴漏问题,确认阳极液通

过阳极渗漏至电泳槽,其为导致电泳液位异常升高的原因之一。

表 1 电泳槽液位升高原因分析

项目	影响因素	验证方法	验证状态	是否关键因素
人	人为误添加	检查人员加料过程	按照过车量添加药剂,无误添加操作	否
机	阳极液泄漏到电泳槽	检查阳极液位是否有变化	阳极液位有持续降低的情况	是
	轴封液泄漏到电泳槽	检查轴封槽液位是否有变化	液位无异常变化	否
	UF3 喷淋流向	UF3 喷淋方向是否有调整	喷嘴方向无调整,且喷淋液不通过过渡段流至电泳进行串槽	否
	加料系统设备异常	检查加料设备状态	设备正常	否
	换热设备漏液	检查制冷站冷水压力是否有变化	制冷站冷水未报压力低,无补水	否
	电泳液位检测设备异常	检查检测设备状态	设备正常	否
料	白车身兜液	无新车型进入	不相关	否
	机运雪橇积液	排查雪橇有无兜液结构	无兜液结构	否
法	入槽喷淋量异常	入槽喷淋纯水量有无增加	喷淋量无增加	否
	出槽喷淋量异常	出槽喷淋纯水量有无增加	喷淋量无增加	否
环	电泳室体冷凝水	观察电泳室体有无冷凝水	无冷凝水	否

## 2 阳极工作原理及问题确认

在阴极电泳中,电泳涂料是带正电荷的树脂和颜料浆,被涂物—车身作为阴极。在阴极上最初是水电解形成氢气和氢氧根离子(OH<sup>-</sup>),这一反应使阴极表面产生高碱性界面层,带正电荷的涂料粒子在阴极上聚集,树脂和颜料与氢氧根离子反应产生涂膜沉积。在阳极区,由于水电解形成大量的氢离子,氢离子的存在使得该区域的酸性不断提高。这些酸如不及时除去,就会进入电泳槽液,使 pH 下降,影响工艺参数的稳定,影响泳透力及涂膜性能,再溶解性增大。除去槽液中游离酸的常用方法是采用阳极隔膜法,阳极隔膜法是将阳极封闭在可冲洗的阳极罩中,极罩由不导电材料制成,敞开面装有离子选择性的隔膜。阳极系统作为阴极电泳工艺的“电荷平衡器”和“电解液稳定器”,其稳定性直接影响涂层质量。

我公司阳极实际操作:阳极液电导率的工艺要求范围为 2 500~5 500 μS/cm,现场设定上限为 4 000 μS/cm,当阳极液电导率超过设定上限值时,阳极系统进入槽液置换操作,阳极回水不再回到阳极槽内,而是自行切换阀门,将阳极液回液排放至地沟,而阳极泵则继续抽取槽内阳极液进行循环,相当于阳极液只出不进,阳极液位急速下降,当液位下降至设置的下限(-500 mm)时,纯水补水阀门打开,进行补水稀释操作,当槽液电导率达到设定下限值 3 000 μS/cm 时,阳极液回液排水阀门关闭,循环回来的阳极液正常回流至阳极槽内,阳极槽液位回升,当阳极槽液达到设定的高液位(-300 mm)时,纯水补水阀门关闭,完成阳极液

置换操作的整个过程。阳极液循环、排补水置换过程可实时上传,在中控可直观查看分析,如图 1 中 3# 位置即为电导率达到上限时的置换曲线。阳极槽液位正常循环无置换时,阳极槽液位基本保持水平状态,无大幅度波动,阳极槽液位正常波动如 2# 位置所示,周期大约为 22 min(连续过车状态下)。

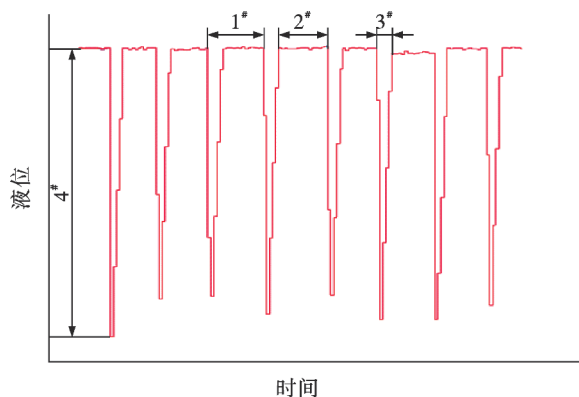


图 1 阳极槽液位正常波动

电泳液位异常升高情况发生后,监测阳极液位的变化趋势,发现液位波动在原本应该水平的周期内,存在下降的情况(如图 2 所示),且核算液位下降损失量,每班阳极液损失量(1 m<sup>3</sup>)与电泳槽液位升高量(10 mm×槽体截面积)吻合,故可以确定阳极液泄漏到电泳槽,是导致电泳槽液位升高的根本原因。

## 3 阳极隔膜破损的现象与排查

阴极电泳涂装工艺中,阳极膜(通常为离子选择性半透膜)用于隔离阳极液(酸性,pH 约为 2.5)与电泳槽

液(碱性或中性, pH 为 6.5~7.0), 维持电泳槽液的稳定性。若膜破损, 可能导致阳极液泄漏至槽液中引发电导率异常、pH 波动、涂膜的性能以及生产效率和成本异常等问题。因此, 一旦发现某一根阳极隔膜破损, 应及时排查处理, 以保证正常的生产。

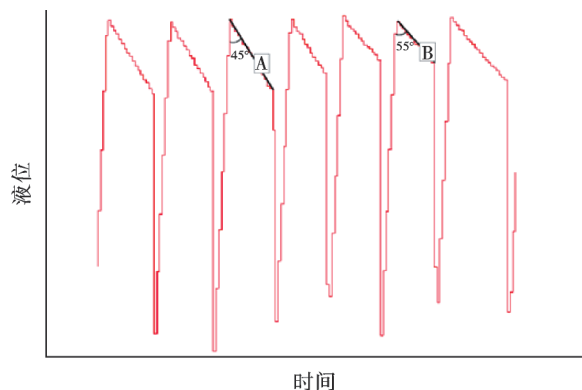


图2 阳极槽液位异常波动

### 3.1 阳极隔膜破损的常见现象

1) 涂层质量异常: 隔膜破损区域电场分布失衡, 导致树脂沉积速率异常, 膜厚不均匀分布, 局部区域膜厚偏差  $>3 \mu\text{m}$  (正常范围  $\pm 1 \mu\text{m}$ ); 涂层表面出现缩孔(直径 0.5~2.0 mm)、针孔(密度  $>5$  个/ $\text{m}^2$ )等缺陷; 破损后金属离子(如  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ )侵入槽液, 破坏涂层交联结构, 涂层防腐性能下降( $<720$  h, 标准  $\geq 1000$  h)。

2) 槽液参数异常: 当阳极隔膜破损时, 阳极液与电泳槽液之间的物质交换失去控制, 大量的电泳涂料可能会渗入到阳极液中, 导致电泳槽液电导率异常波动(典型值从  $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$  升至  $1800 \mu\text{S}/\text{cm}$ ); 阳极液中酸性成分(如甲酸)泄漏, 中和槽液碱性环境, 导致槽液 pH 下降(pH 日波动  $>0.3$ , 正常波动  $\leq 0.1$ ), 电导率异常升高, 引发树脂絮凝(絮凝物粒径  $>50 \mu\text{m}$ )。

3) 设备运行异常: 隔膜破损导致阳极液泄漏, 循环泵出口压力从 0.15 MPa 降至 0.08 MPa; 在正常工况下, 槽电压波动  $<5$  V, 破损后波动幅度可达 20 V 以上(如 250 V  $\rightarrow$  270 V  $\rightarrow$  230 V); 隔膜失效后 Cl 接触阳极板, 加速 316L 不锈钢点蚀(腐蚀速率从 0.01 mm/a 升至 0.1 mm/a), 阳极管异常腐蚀。

### 3.2 阳极膜破损的排查方法

目前常用的阳极隔膜破损排查方法包括传统的观察法、参数监测法和新兴的技术手段。

#### 3.2.1 观察法

观察法通过在阳极管进出水管靠近电泳槽端设置观察口, 直接目视检查流出液的颜色变化, 阳极液应是清澈而透明的, 如果浑浊说明有电泳液进入了阳极液。或通过倒槽检查破损阳极膜, 并进行更换是最直接有

效的方法, 倒槽后, 可通过观察阳极膜外观以及整支阳极膜底部滴液情况, 快速准确确认并隔离破损膜组。但电泳倒槽费时费力, 且存在一定量的电泳漆损失, 更重要的是电泳倒槽至少需要 2 d 时间, 对连续生产的生产线, 会严重影响生产线节拍甚至整个工厂的产能, 每次发现阳极膜破损就倒槽进行检查更换显然是不现实的。

#### 3.2.2 参数监测法

参数监测法则依赖于实时监控阳极液的电导率和混浊度, 这些参数在隔膜完好时保持稳定, 一旦阳极隔膜出现破损, 电泳漆混入会导致这些参数异常升高, 就可以判断阳极隔膜是否破损<sup>[1]</sup>。浊度仪可以实现阳极液颜色的自动监测, 当电泳液透过隔膜, 进入阳极槽造成阳极液污染时, 浊度仪数据会超标, 控制系统会发出警报并等待问题的处理<sup>[2]</sup>。如果电泳液进入阳极槽未及时处理, 通电后会使得阳极隔膜内表面上漆, 影响阳极液在阴、阳极之间的流动性, 对涂层的质量和生产效率造成不良影响。这种属于常见的阳极膜破损能及时观察到的情况。尽管这些方法能有效检测阳极膜状态, 但在检测微小破损时, 由于阳极液颜色和透明度变化不明显, 可能导致检测灵敏度不足和及时性问题的。

#### 3.2.3 新兴技术手段

无损检测技术(超声波检测、红外检测等)、基于传感器的监测技术以及数据分析方法等, 虽然具有较高的检测精度和实时性, 但也面临着成本高、技术复杂、对操作人员要求高等挑战。例如, 超声波检测技术需要专业的设备和操作人员, 检测成本较高, 且在复杂的工业环境中, 可能会受到干扰, 影响检测结果的准确性。

## 4 问题解决

电泳液位异常升高原因明确后, 为了快速阻断阳极液泄漏对电泳槽液及电泳漆膜的影响, 需第一时间排查、确认并关闭隔离破损的阳极膜, 阻断渗漏源。

以往发生的阳极膜渗漏问题, 均为阳极液浑浊后发现的。当发现阳极液浑浊, 我公司现场采取的常规方法如下所述。

在不过车, 关闭整流源、不通电的情况下:

1) 关闭阳极液循环泵, 排空阳极槽内残液;

2) 在阳极槽内补充新鲜纯水, 切换阳极回水阀门至直排状态(气动阀阀门进行手动调节, 如图 3 标红的螺母横线与排液管道平行);

3) 开启阳极循环泵, 抽取阳极槽内的新鲜纯水进行直排置换约 10 min, 将阳极管中滞留的残液顶出,

再次关闭阳极循环泵;

4) 切换回水阀门至阳极槽内(如图3标红的螺母横线与排液管道垂直);

5) 阳极循环旁通开启 3/4 水回流至罐内,防止循环泵被憋死损坏;

6) 关闭所有单支阳极的进液口阀门(图4中流量计下方阀门),静置 15 min;

7) 开启阳极循环泵,两人配合,一人在电泳槽侧面平台,抽出阳极回水管路,并做好引流,通知另一人在小二层平台,逐支开启阳极进液口阀门,观察回水浑浊度;

8) 回水流出时浊度有异常,则确定此膜异常。



图3 现场气动阀

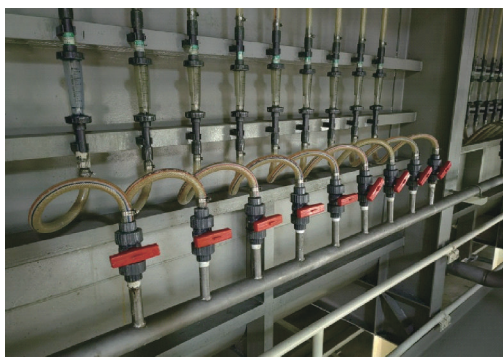


图4 现场阳极流量计入口阀门

此次问题发生又与以往阳极液变浑浊的阳极膜破损状态不同,现场在正常生产的情况下,无法通过回水浑浊现象确认破损的阳极膜,如何锁定问题阳极膜成为新的需要解决的问题。

通过不断摸索,现场确定了一种在参数监测法基础上衍生的液位变化排查法,通过中控室观察阳极槽液位的变化趋势,来排查确定破损阳极膜。同样两个人进行协同作业,一个人在中控室通过监测阳极槽液位

变化趋势图,持续关注阳极槽液位的波动情况(图1~2),另一个人在现场按次序关闭单只或多只阳极管进液口阀门(图4),以5~10支为一组,观察1~2个排放周期,根据观察周期内液位变化趋势及曲线倾斜度,确认关闭膜组的破损情况。

图2中,A线是问题发生后的液位下降趋势,B线是关闭某一膜组阳极进液,循环一个周期的液位下降趋势,以A线为基准,借助量角器等工具,对比分析A线与B线的角度倾斜情况,若B线处角度比A线处角度大,说明关闭的这膜组中有破损的阳极膜,也就是说,关闭了破损阳极管,就减少了阳极液往电泳槽渗漏的流量,阳极槽液位下降的趋势就更平缓;若B线处角度比A线处角度小或角度无变化时,则说明关闭的这一组阳极膜无异常。对有渗漏的膜组,缩小范围再进行单支验证,即可确定破损阳极膜;问题阳极膜标记并关闭入口阀门,继续验证后面的阳极膜,直到所有阳极膜验证完毕。

我公司现场电泳槽共有194支管状隔膜阳极,在连续过车,不影响生产的情况下,经过2个班的时间验证,锁定了破损阳极的位置,关闭对应阳极管的进液阀门后,电泳液位恢复正常状态。

后续利用周末停产,将锁定的破损阳极从电泳槽中取出,可以发现阳极膜表面有粉化脱落现象。将所有的问题隔膜阳极进行更换,跟踪一个月,电泳液位未见异常变化。

## 5 结语

阳极隔膜是阳极系统的关键组件,如果出现隔膜破损泄漏对电泳槽液的稳定以及电泳涂层质量会产生较大影响,出现破损必须及时排查将其与系统隔绝,这样才能发挥阳极系统的功能,为生产出良好的电泳防腐涂层提供保证。

阴极电泳阳极隔膜破损排查是车身油漆质量检测工作中的重要环节,直接关系到电泳涂装的质量和车身的耐腐蚀性能。不同的生产情况、不同的泄露方式,需要采用不同的排查方法,才能准确快速地找出问题产生的原因。及时准确的参数跟踪,更精益的现场工艺管理,以及快速有效地响应排查,才能保证电泳系统的正常运转,保证车身的电泳质量。

## 参考文献:

- [1] 肖海英.阴极电泳涂装的阳极系统维护[J].汽车工艺与材料, 2009(11):20-21
- [2] 王雷.阴极电泳中的阳极系统的应用和维护[J].科技风, 2013(11):123-124.