

工程机械结构件电泳缩孔原因分析及解决

李杰

(三一汽车制造有限公司,长沙 410199)

摘要: 从工程机械结构件边缘特定位置出现带状密集型缩孔的实际案例出发,阐述缩孔的形成因素及排查方法,结合原因分析提出对涂装电压、阳极数量及排布方式、杂质离子浓度管控等3方面采取相应改善措施,为工程机械阴极电泳涂装缩孔问题提供借鉴经验。

关键词: 阴极电泳; 涂装; 缩孔; 阳极排布

中图分类号:TQ639 文献标志码:B 文章编号:1007-9548(2024)01-0040-03

Analysis and Solution of Shrinkage in Construction Machinery Structural Parts Electrophoresis

LI Jie

(Sany Automobile Manufacturing Co., Ltd., Changsha 410199, China)

Abstract: Based on the actual case of ribbon-intensive shrinkage in the specific position of construction machinery structural parts, the forming factors and screening methods of shrinkage were described, and the corresponding measures to adjust the anodic arrangement were put forward combining with the analysis of causes, providing reference experience for the industry to solve the problem of shrinkage in construction machinery structural parts cathodic electrophoretic painting.

Key words: cathode electrophoresis; painting; shrinkage; anode arrangement

0 引言

阴极电泳涂料自问世以来,已有超过50年的发展历史。其涂层均匀致密、平整光滑、防腐性能优异,因此,阴极电泳涂装方法广泛应用于诸多行业,如五金、家电、机械制造及汽车行业等。阴极电泳涂层具有各种良好性能的前提是涂层需完整、均匀、致密,但在实际涂装过程中,时常由于各种各样的原因导致涂层产生颗粒、缩孔、针孔等缺陷。其中,缩孔是电泳涂装中常见的一种漆膜缺陷,严重影响外观质量及表面防腐性能。本文基于我公司生产结构件时遇到的边缘特定位置出现带状密集型缩孔的实际案例,阐述了缩孔的形成因素及排查方法,结合原因分析提出针对性解决措施,为同行解决阴极电泳涂装缩孔问题提供借鉴经验。

收稿日期:2022-12-19

作者简介:李杰(1990—),男,硕士,工程师,主要从事涂装工艺和设备研究应用工作。E-mail:lj201279@aliyun.com。

1 缩孔的形成因素与排除

我公司生产所有结构件时,发现边缘特定位置出现带状密集型缩孔。单台、连续过件均出现密集状缩孔,发生概率100%,约10个/cm²,说明该问题属于系统性问题,并非偶然现象,因此需对生产过程中缩孔的形成因素进行全面排查。缩孔的形成受到3方面的影响,即前处理、电泳槽液、涂装设备,缩孔的形成可能受到其中一个或多个方面的影响,因而在排查缩孔时,需对这3个方面进行全面排查。

1.1 前处理的影响

若前处理脱脂能力下降,导致脱脂不彻底、有油污等异物残留,则会在局部位置形成缩孔。调取发生问题最近一周前处理预脱脂及脱脂参数监测记录,监测记录见表1。通过对比检测指标与检测记录,发现前处理预脱脂及脱脂实际检测参数无明显波动,均符合检测指标要求。经人工检查,工件表面清洁,且缩孔形成部位为简单平面结构,不存在缝隙积液问题,说明此次缩

孔问题与前处理预脱脂、脱脂的关联性低,排除前处理对缩孔形成的影响。

表1 前处理预脱脂及脱脂参数监测记录

日期	预脱脂游离碱/pt	脱脂游离碱/pt
2022-6-2	10.8	11.3
2022-6-3	10.8	11.3
2022-6-4	10.7	11.3
2022-6-5	10.7	11.2
2022-6-6	10.7	11.2
2022-6-7	10.6	11.1
2022-6-8	10.6	11.1

注:预脱脂和脱脂游离碱检测指标均为 8.0~12.0 pt。

1.2 槽液电导率的影响

槽液电导率是反映电泳涂料成膜反应速率的一项重要参数,电导率的高低影响成膜的快慢。若电导率过高,导致成膜反应剧烈,容易在局部位置产生击穿而形成缩孔。现场槽液电导率为 1 766 $\mu\text{S}/\text{cm}$,符合检测指标 1 200~1 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。现场槽液送实验室调整电导率,并验证电导率对漆膜膜厚、外观的影响,验证结果见表 2。

表2 电导率对漆膜膜厚、外观的影响(小样品,平板)

电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	膜厚/ μm	外观
1 466	22.5	平整、光滑,粗糙度 $Ra=0.21 \mu\text{m}$
1 754	24.1	平整、光滑,粗糙度 $Ra=0.19 \mu\text{m}$
2 168	27.4	平整、光滑,粗糙度 $Ra=0.26 \mu\text{m}$
2 402	21.8	平整,粗糙度 $Ra=0.38 \mu\text{m}$,流平下降
2 895	19.2	粗糙度 $Ra=0.52 \mu\text{m}$,出现轻微、4 倍放大镜可见的细小缩孔区(长约 10 cm、宽 2 mm 丝带状)

根据电导率调整结果,电导率处于适当范围时,漆膜外观平整、光滑。当电导率过高时,漆膜外观变差甚至出现缩孔问题。现场槽液电导率较高,初步判断槽液电导率与此次缩孔问题存在关联,为关联因素。

1.3 槽液固体分的影响

槽液的固体分是电泳槽液参数监测的主要指标之一,对漆膜外观具有较为重要的影响。现场槽液固体分为 17.8%,符合检测指标 16.0%~20.0%。现场槽液送实验室添加乳液调整固体分,并验证固体分对漆膜膜厚、外观的影响,验证结果见表 3。

根据固体分调整结果,当固体分在适当范围内时,漆膜的膜厚、外观无明显差异,判断槽液固体分与此次缩孔问题不存在关联性,为无关因素。

1.4 槽液溶剂含量的影响

槽液的溶剂含量是影响漆膜流平外观及膜厚的重要指标之一,溶剂含量过低,漆膜粗糙多孔;溶剂含量过高,漆膜偏厚,橘皮严重。现场槽液溶剂含量为 0.78%,符合检测指标 0.5%~2.0%。现场槽液送实验室添加溶剂调整溶剂含量,并验证溶剂含量对漆膜膜厚、外观的影响,验证结果见表 4。

表3 固体分对漆膜膜厚、外观的影响(小样品,平板)

固体分/%	膜厚/ μm	外观
14.6	22.1	平整、光滑
16.2	22.7	平整、光滑
17.8	23.5	平整、光滑
19.2	24.2	平整、光滑
22.0	27.6	平整、光滑

表4 溶剂含量对漆膜膜厚、外观的影响(小样品,平板)

溶剂含量/%	膜厚/ μm	外观
0.48	19.5	平整、光滑
0.78	22.7	平整、光滑
1.18	25.5	平整、光滑
1.64	26.9	平整、光滑
2.51	32.4	平整、光滑

根据溶剂含量调整结果,提高溶剂含量对解决缩孔问题无显著效果,判断槽液溶剂含量与此次缩孔问题不存在关联性,为无关因素。

1.5 涂装电压的影响

涂装电压是控制漆膜厚度的直接关键因素,若涂装电压过高,漆膜变厚,局部位置易击穿,从而导致缩孔问题。现场涂装电压为两段式升压,第一段电压 100 V,第二段电压 240 V。现场调整涂装电压,验证涂装电压对漆膜膜厚、外观的影响,验证结果见表 5。

表5 涂装电压对漆膜膜厚、外观的影响(现场,A 工件)

涂装电压及时间(两段)	膜厚/ μm	外观
140 V/140 V(60 s+180 s)	14.6	平整、光滑
180 V/220 V(60 s+180 s)	20.3	平整、光滑
200 V/260 V(60 s+180 s)	23.1	工件出现小缩孔,约 2 个/ cm^2
200 V/300 V(60 s+180 s)	25.7	工件出现小缩孔,约 10 个/ cm^2
220 V/320 V(60 s+180 s)	25.9	工件出现小缩孔,约 10 个/ cm^2

根据现场涂装电压调整结果,适当降低电压可缓解缩孔问题,但无法彻底解决缩孔问题,判断涂装电压

与此次缩孔问题存在关联性,为关联因素。

1.6 阳极数量及排布方式的影响

阳极数量及排布方式对现场涂装电场分布具有重要影响,若阳极数量及排布不当,易造成电场分布不均,局部位置易击穿,从而形成局部缩孔。涂装现场一段涂装区域分布单边 16 块阳极板、二段涂装区域分布单边 20 块阳极板,采用对称式分布。调整两段涂装区域阳极数量及排布方式,验证阳极数量及排布方式对漆膜外观的影响,验证结果见表 6。

表 6 阳极数量及排布方式对漆膜外观的影响

一段阳极数/二段阳极数(排布方式)	外观
16/20(对称)	缩孔约 10 个/cm ²
14/18(对称)	缩孔约 10 个/cm ²
12/16(对称)	缩孔约 8 个/cm ²
8/10(对称)	缩孔约 2 个/cm ²
12/16(交叉)	缩孔约 8 个/cm ²
10/14(交叉)	缩孔约 2 个/cm ²
8/10(交叉)	缩孔约 2 个/cm ²

根据阳极数量及排布方式对漆膜外观影响的验证结果,在涂装电压一定时,适当的阳极数量有助于改善漆膜外观。当涂装电压与阳极数量不相适应时,容易造成局部击穿,导致漆膜产生缩孔弊病。同时,当涂装电压与阳极数量一定时,对于此次缩孔问题的解决,采用阳极交叉排布方式比阳极对称排布方式效果更优。采用适当的阳极数量及排布方式,可减少 90%以上缩孔问题面积,但无法彻底解决缩孔问题。因此,判断阳极数量及排布方式与此次缩孔问题存在关联性,为关联因素。

1.7 带电情况的影响

工件进入电泳工序时的带电情况也会影响缩孔的形成,若入槽时工件带电,易造成漆膜粗糙多孔,从而产生缩孔。经检测,工件运输过程电路正常运行,工件不带电。说明工件入槽时带电情况与此次缩孔问题不存在关联性,为无关因素。

1.8 槽液杂质离子的影响

槽液杂质离子的浓度对槽液成膜反应有一定影响,杂质离子浓度过高,漆膜粗糙多孔。经检测,现场 Na 浓度为 1.56×10^{-4} 、K 浓度为 0.65×10^{-4} 、Fe 浓度为 5.62×10^{-4} ,均不符合检测指标规定的 $\leq 0.50 \times 10^{-4}$ 。现场通过排放超滤液降低杂质离子浓度,检测结果见表 7。

根据超滤液排放量与各元素含量变化情况,当超滤液排放量达到槽液质量的 100%时,槽液杂质离子浓度回归正常水平。经单台过件及连续过件验证,工件

边缘位置带状密集型缩孔消失,漆膜外观恢复平整光滑。说明槽液杂质离子浓度与此次缩孔问题存在关联性,为关联因素。

表 7 超滤液排放量、各元素含量变化与漆膜外观情况

超滤液排放量 (按槽液质量计)/%	Na/ ($\times 10^{-4}$)	K/ ($\times 10^{-4}$)	Fe/ ($\times 10^{-4}$)	工件缩孔情况 缩孔/(个数·cm ²)
0	1.56	0.65	5.62	10
20	1.30	0.52	4.57	8
40	0.97	0.41	3.43	2
60	0.66	0.30	2.28	0
80	0.39	0.24	1.45	0
100	0.18	0.14	0.36	0

注:Na、K、Fe 浓度均为元素含量,包含可能存在的各种离子形式。

2 原因分析

经排查,槽液电导率、涂装电压、阳极数量及排布方式、杂质离子浓度等 4 个因素为此次缩孔问题的关联因素。其中,槽液电导率、涂装电压、阳极数量及排布方式的关联程度一般,为次要因素;杂质离子浓度的关联程度高,为主要因素。

杂质离子浓度高引起槽液电导率升高,在相同涂装电压下,电解反应加剧,生成大量氢气和氧气,工件表面(阴极)树脂沉积速度快,树脂粒子易裹挟氢气在工件上沉积,气体逸散不及时,则容易形成多孔漆膜。同时,过高的涂装电压进一步加剧电解反应,使缩孔问题更加明显。在此基础上,阳极排布方式也会影响工件表面的电势分布,当局部位置电势过大,易形成局部击穿,从而产生缩孔。

基于上述 4 方面原因,要解决此次工件边缘位置带状密集型缩孔问题,需对涂装电压、阳极数量及排布方式、杂质离子浓度等 3 方面采取相应改善措施。

3 解决措施及效果

3.1 临时措施

由于电压过高、反应剧烈导致缩孔产生,因此可通过降低反应活性临时解决缩孔问题:保持电泳总时间不变,一段电压 100 V 升至二段电压 240 V 的软启动时间由 5 s 延长至 10 s,一段涂装电压由 100 V 降低至 80 V。由于电压下降,涂装时间不变,导致总体膜厚下降,需适当补充槽液总质量 0.2% 的溶剂补偿膜厚。同时,阳极排列方式涉及膜厚及内腔涂装,故不作变化。

经上述调整,带状密集型缩孔面积可缩小至原来的 10% 以下,出现概率降低为原来 10%,再采取打磨、砂磨等方式进行小范围修补即可。

3.2 永久措施

经过一次性超滤液排放 20% 直至(下转第 63 页)