汽车涂装车间精修线一次交验合格率提升

田孟辙

（北京奔驰汽车有限公司，北京 100176）

摘要：为提升汽车涂装车间精修线一次交验率，针对缩孔、杂漆、流漆、溶剂点及漆渣等核心面漆缺陷展开研究。运用生产制造报告系统（MRS）及“人、机、料、法、环”真因分析法，结合红外光谱、元素分析及生产验证等手段，系统诊断了各类缺陷的根源。通过更换高温区含氟润滑脂、优化喷涂颜色排序、加强设备预防性维护、调整工艺参数及更换故障部件等措施，使精修线一次交验合格率由79%提升至91%，日均堵线时间缩短62%。研究表明，系统性根因分析与精准工艺改进是提升涂装质量与生产效率的关键。

关键词：精修　一次交验合格率　面漆　缺陷　质量

中图分类号：U466　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250225

Improvement of First Pass Yied of the Polish Line in an Automobile Paint Shop

Tian Mengzhe

(Beijing Benz Automotive Company, Beijing 100176)

Abstract: To improve the first pass yield rate of polish line in an automobile paint shop, this paper focuses on the critical top coat defects such as crater, other paint, paint runner, solvent spot and paint sludge. The research diagnoses the root causes of various defects systematically through Manufacturing Report System (MRS) quality analysis system and “human, machine, material, methodology, environment” real reason analysis method combining infrared spectrum, element analysis and production verification. There are some targeted countermeasures to solve the defect issues such as changing the fluorine-containing lubricating grease of high temperature zone, optimizing top coat color sequence, strengthen equipment pre-maintenance, adjusting process parameter and changing fault part. The first pass yield of polish line increases from 79% to 91% and the average daily line downtime is reduced by 62% due to the countermeasures implementation. The research shows that systemtic root cause analysis and precise process impoovements are the key to enhancing coating quality and production efficiency.

Key words: Polish, First delivery rate, Top coat, Defect, Quality

1 前言

精修线是汽车涂装生产体系中的关键环节，其主要功能是对涂装后白车身表面存在的各类缺陷进行修复与修饰，所处理的缺陷类型主要包括面漆缺陷、密封胶缺陷以及少量源自焊接工序的缺陷。

彭小龙[1]对汽车喷涂作业中常见的漆面缺陷，如流漆、原子灰印、橘皮、发花、失光、砂纸痕、缩孔等进行了成因分析并提出了相应解决措施。杨东等[2]通过分析车身涂层缩孔缺陷，采取增设电泳槽液除油过滤袋的有效措施，避免了槽液中的油污附着在电泳车身表面造成漆后缩孔。金靖鹏等[3]从涂装前处理工序溯源，指出磷化工艺参数异常会导致磷化结晶层结构不均匀，进而在电泳涂层中形成微观孔洞，最终在面漆喷涂阶段

作者简介：田孟辙（1988—），男，高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车涂装车间工艺参数及机器人喷涂程序设计、优化与产品质量控制。

参考文献引用格式：

田孟辙. 汽车涂装车间精修线一次交验合格率提升[J]. 汽车工艺与材料, 2026(3): 47-54.

TIAN M Z. Improvement of First Pass Yied of the Polish Line in an Automobile Paint Shop[J]. Automobile Technology & Material, 2026(3): 47-54.

表现为缩孔缺陷。苏晓卫等[4]从喷漆室风速、风平衡、温湿度等环境因素入手分析了杂漆缺陷的生成机理，通过将相应环境参数调控在工艺窗口之内有效降低了发生率。杜涛[5]等运用数据统计与缺陷分析方法诊断并解决了生产中的流漆问题。

结合国内外研究现状及行业实践经验，目前对于面漆缺陷的根因分析多聚焦于喷漆室环境、前处理、电泳等前道工序。本文基于“人、机、料、法、环”5个维度，运用真因分析法，重点围绕影响面漆外观质量的喷漆室设备与材料因素展开研究，旨在制定系统性的长效改进方案，持续提升精修线一次交验合格率。

2 精修线质量现状

基于车间质量问题分析软件生产制造报告系统（Manufacturing Reporting System，MRS）对精修线质量问题的统计与分析，发现当前生产线日均一次交验合格率为79%。为明确质量改进方向，对影响该指标的主要涂装缺陷进行了归类与分析，具体分布如图1所示。

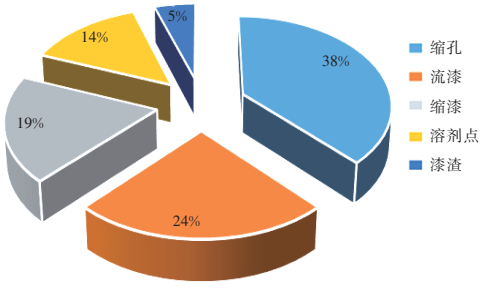


图1 影响一次交验合格率缺陷分析

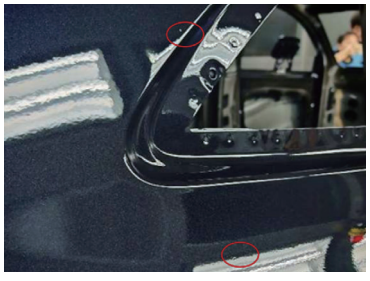
由图1可知，在诸多缺陷中，缩孔是对一次交验合格率影响最为显著的缺陷类型，其余缺陷按影响程度（即所占比例）由高至低依次为杂漆、流漆、溶剂点和漆渣。因此，要有效提升精修线一次交验合格率，须对上述几类核心漆面缺陷进行根本原因分析并制定解决措施。

车身一次交验合格率低会直接导致生产流程不畅，引发精修线拥堵。未通过一次交验的车身需转入点补缓冲区进行返修作业，当缓冲区积压车辆过多时，会阻碍精修线的正常流通。因此，缓解乃至消除精修线堵线现象提升是一次交验合格率的关键途径。

3 精修线一次交验合格率提升

3.1 面漆缩孔问题分析与解决

缩孔是涂装过程中常见的漆膜缺陷，其典型形貌呈现为“火山口”状凹陷，直径通常为0.2~2 mm。根据形态差异可分为中心有凸起堆尖及平底无尖2种类型，且在电泳、中涂、色漆、清漆等各涂层阶段均可能发生。其形成机理主要源于涂料体系表面张力的局部失衡：当涂层表面受到低表面张力的污染物侵袭，或涂料自身因成分变化导致相容性不佳时，漆膜便会向周围收缩，从而形成凹陷。这些污染物（即缩孔源）可能包括硅酮、各类润滑油、脱模剂、化妆品等与涂料不相容的物质。典型的缩孔形貌如图2所示。



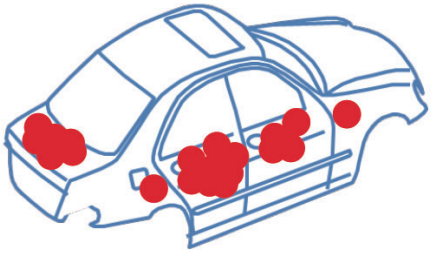
（a）右后围缩孔



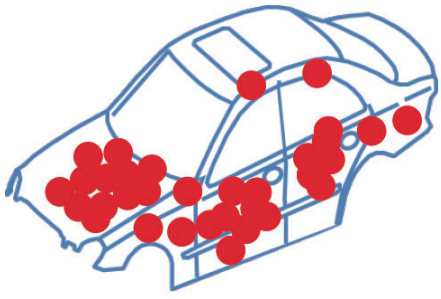
（b）车顶左侧缩孔

图2 车身缩孔形貌

通过对生产数据的统计分析，发现缩孔缺陷在车身上的分布具有区域集中性，主要集中在四门两盖的外板区域。其中，发动机舱盖的缩孔数量多于行李厢盖，左侧车门的缩孔多于右侧车门，具体分布密集情况如图3所示。



（a）车身右侧缩孔密集图



(b)车身左侧缩孔密集情况

图3　车身缩孔位置

缩孔问题对精修线一次影响交验率的影响为8.3%,日均61台车返修,并造成精修线拥堵66 min,是制约一次交验合格率提升的关键因素。为此,采用鱼骨图从人、机、料、法、环5个维度分析缩孔问题的根本原因,如图4所示。

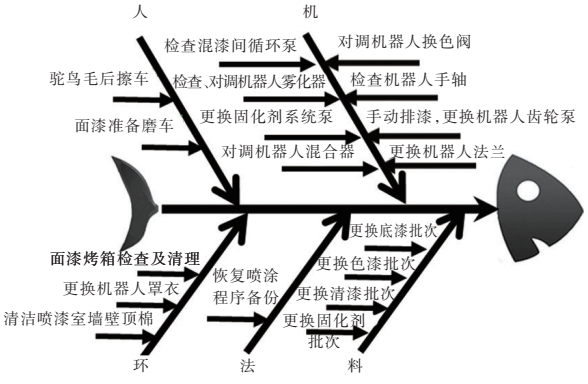


图4　缩孔产生的原因分析

通过5WHY真因分析法分析发现,仅在喷漆室前工序增加人工操作处理,车身表面能减少部分缩孔的产生,而喷漆室内的设备、材料、工艺及环境参数的调整均无法消除此缺陷,表明缩孔污染源来自喷漆室前的某工序。进一步对比分析发现,在面漆准备工位增加打磨操作,比在鸵鸟毛除尘工位前增加擦净操作,对降低缩孔发生率更为有效。这是由于打磨能更彻底地去除渗透至电泳涂层内的污染物。然而,无论是增加打磨还是擦净操作,均会导致生产线停线,造成产能与质量损失。因此,必须精准定位缩孔污染物源头。

为追溯污染源,对缩孔缺陷进行了系统的取样与试验分析。首先进行剖面测试,如图5所示,结果显示缩孔中心区域清漆层缺失,缺陷从色漆层即已开始形成。随后,轻微刮取3个缩孔表面的物质进行显微红外光谱分析,三者均检测到含氟聚合物成分,该成分与烘烤炉使用的高温轴承润滑脂高度相似。进一步的元素分析也在缩孔中心检测到明显的氟元素信号。

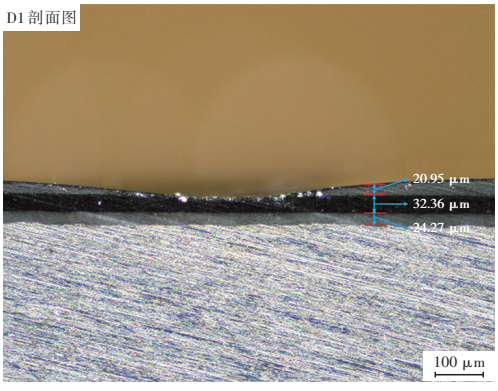


图5　缩孔剖面

基于在污染物中检出大量含氟物质,并将此成分与高温轴承油关联,调查重点聚焦于喷漆室前的高温烘烤炉。涂装车间有电泳烤箱、密封胶(Polyvinyl chloride,PVC)烤箱、闪蒸烤箱、面漆烤箱、注蜡烤箱5个烘烤设备。其中前3个为高温烘炉,而喷漆室前的高温烤箱只有电泳烤箱和PVC烤箱。在喷漆室及之前可疑工序放置洁净的电泳板,进行20 h的静止污染物收集测试,测试点包括电泳烤箱入口、PVC烤箱出口、喷漆室入口前和喷漆室内4个位置开展。在电泳烤箱入口升降机和PVC烤箱出口升降机区域的测试板上发现了明显的污染物滴落,如图6所示。



图6　静止测试板污染物状态

经核查,车间共有4台位于高温区域(电泳及PVC烘炉出入口)的升降机使用了含氟高温润滑脂。该润滑脂主要成分为基础油全氟聚醚和增稠剂聚四氟乙烯。对近期这4台设备的维护施工记录进行汇总,如表1所示。

表1 高温升降机施工情况

名称	位置	施工时间	施工内容
电泳烤箱	入口	2025.01.19	更换行走轮支架，并润滑
		2025.02.23	更换底部链轮与轴承座，并润滑
		2025.03.02	更换配种靠轮支架
	出口	2025.01.19	更换底部链轮与轴承座
		2025.02.23	更换行走轮支架，并润滑
		2025.03.02	更换配种靠轮支架
PVC烤箱	入口	2025.01.19	更换底部链轮与轴承座
		2025.02.23	更换行走轮支架，并润滑
		2025.03.02	更换配种靠轮支架
	出口	2025.01.19	更换底部链轮与轴承座
		2025.02.23	更换行走轮支架，并润滑
		2025.03.02	更换配种靠轮支架

由表1可知，烤箱高温升降机定期的维护和润滑作业，导致含氟高温润滑脂被带入车间环境，并滴落或飘散至车身表面，成为引发缩孔的根本污染源。因此，需要采用不含氟元素且与涂料相容性良好的高温润滑脂作为轴承油，实施更换后，缩孔缺陷对一次交验合格率的影响由8.3%下降至3.2%，有效提升了漆后车身质量。为预防类似问题，将采取长效管控措施：对所有可能进入车间的化学品、润滑剂、辅料等进行涂料相容性（特别是缩孔倾向）测试，合格后准入。制定车间各区域，尤其是烘炉区、升降机等关键设备的清洁标准和检查制度。加强对入厂涂料及各化工料批次的质量监控与追溯，确保材料性能的稳定。

3.2 杂漆问题分析与解决

杂漆是指在机器人喷涂面漆后，漆膜表面出现颜色不均匀或异色斑点的缺陷，属于湿膜状态下被相同颜色但批次、性状略有差异的漆料或其他颜色漆料污染所致。其产生的根本原因在于喷涂系统（特别是机器人换色阀块及管路）在颜色切换过程中清洗不充分，或因生产排程导致换色过于频繁，致使残余的杂色漆与当前喷涂的正常色漆混合，在车身表面形成可见的颜色差异。

在本案例中，白色车身出现的杂漆缺陷较多，对一次交验合格率的影响比例达5.1%，日均导致38台车返工，并造成精修线拥堵42 min。典型杂漆缺陷如图7所示。该缺陷主要分布于右前门、右C柱、左后门、后盖、左后围，各位置发生杂漆比例如图8所示。

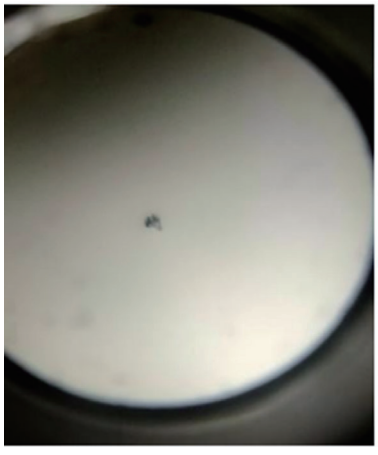


图7 杂漆状态

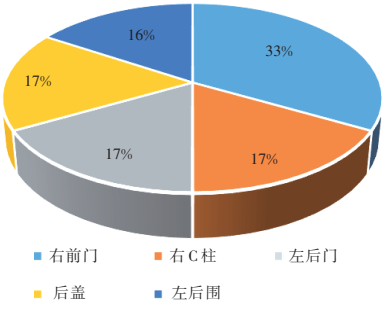


图8 各位置杂漆比例

鉴于白色等浅色车身的漆膜对颜色污染极为敏感，且缺陷位置分散，仅依靠离线修复效率低下。因此，控制重点转向分析喷涂系统换色频次与杂漆发生率之间的关联。优化前白色车身生产数据的统计分析如表2所示。

表2 优化前白色车身换色次数与杂漆数量的关系

生产批次	批次产量/台	换色次数/次	产生杂漆车数/台
1	80	20	5
2	80	40	16
3	80	40	13
4	80	16	4

由表2可知，在每日产量固定的情况下，将车身分为4个小批次（每批80台）喷涂，换色次数居高不下。数据表明，换色次数与杂漆发生数量呈正相关，换色越频繁，系统清洗不彻底的风险越高，导致杂漆缺陷车数显著增加。

为解决此问题,对喷涂排序逻辑进行优化。核心策略是实施颜色分组生产。将喷涂数量较多的颜色(如白色)定义为“大颜色”,喷涂数量较少的颜色定义为“小颜色”,大颜色车身集中连续喷涂,小颜色车身穿插在大颜色车身中进行喷涂,尽最大可能减少换色次数,降低产生杂漆的风险。优化后的生产数据如表3所示。

表3　优化后白色车身换色次数与杂漆数量的关系

生产批次	批次数量/台	换色次数/次	产生杂漆车数/台
1	110	19	2
2	110	20	8
3	110	20	7

通过对比优化前后数据可知,在总产量相近的前提下,通过合并生产批次、增大单一颜色连续喷涂数量,大幅降低了平均换色次数,杂漆缺陷车数量显著减少。效果量化显示,杂漆对一次交验合格率的影响由5.1%降至2.1%,日均需返修的车身由38台减少至17台。此项基于生产排序的优化措施,在不增加设备改造成本的前提下,有效提升了精修线一次交验合格率与生产流畅度。

3.3　流漆问题分析与解决

流漆(亦称流挂)是涂装过程中常见的漆膜缺陷,在电泳、中涂、色漆或清漆等各涂层均可能发生。根据严重程度,可分为明显的流挂与仅在特定光线和角度下可见的轻微流痕。该缺陷多发于车身垂直面的边缘、棱角及内腔等区域,如翼子板边缘、发动机舱盖边缘、各立柱及门内板等。对缺陷部位进行膜厚测量,通常会发现其漆膜厚度显著高于周边正常区域。流漆产生的根本机理为,湿漆膜在重力作用下的流动速度超过了其自身固化(粘度增长)的速度,导致涂料在垂直表面向下流淌并积聚。

流漆问题影响交验率的比例为3.8%,日均导致31台车返修,并造成精修线拥堵33 min。流漆的典型形貌如图9所示。进一步对产生流漆的车身颜色和具体位置进行统计,如图10、图11所示。

由图10可知,深色系车身更易出现流漆缺陷,其中,黑色车身的流漆问题比棕色车身更为突出。从位置分布(图11)看,流漆主要集中于左B柱、右后门内板、右C柱及右侧油箱口盖边缘。针对上述高频发生位置,进行根本原因分析并制定控制措施,如表4所示。



图9　流漆状态

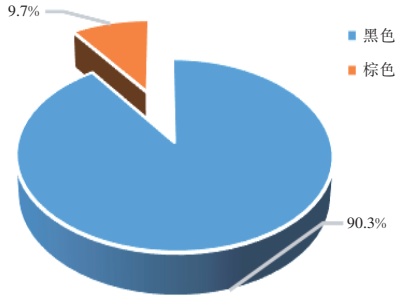


图10　流漆颜色分类

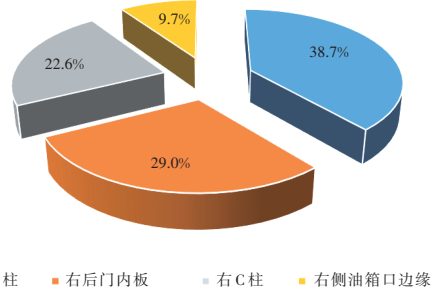


图11　流漆位置分布

表4　流漆问题根本原因及解决措施

流漆位置	根本原因	解决措施
左B柱	清漆内板机器人6轴报警	更换机器人轴电机
右后门内板	底漆内板机器人换色阀泄漏	更换机器人换色阀
右C柱	底漆与电泳漆附着力较低	板材表面存在白车身打磨痕
右侧油箱口边缘	该批次色漆黏度较低	更换较高黏度色漆批次

由表4可见,引发流漆的原因主要为设备状态、基材(白车身)表面质量以及材料性能。对此,形成以下控制策略:

a. 设备方面：需监控喷涂机器人的运行稳定性，对频发的报警或性能衰减及时检修，避免因设备问题导致喷涂参数失准。

b. 基材方面：需关注电泳漆膜质量及白车身表面的平整度。若发现前道工序遗留的打磨痕、电泳缺陷等，应及时反馈并要求在面漆喷涂前进行合规处理，确保涂层附着基础良好。

c. 材料与工艺方面：油漆粘度是影响流挂的关键参数。当材料粘度偏低时，尤其在流量设置较高的区域，极易产生流漆。因此，需确保入厂涂料粘度符合工艺规范，并可根据实际情况微调喷涂流量、雾化空气等参数，使喷涂程序适应材料的正常波动。

通过实施上述综合性措施，流漆问题得到有效控制，流漆对一次交验合格率的影响已由优化前的 3.8% 下降至 1.9%，造成的堵线时间由每天 33 min 下降至 15 min，有效提升了精修线一次交验合格率。

此外，为防止未来在新车型或新颜色导入时出现类似问题，可采取以下前瞻性措施：优化喷涂仿形程序与参数（如增加雾化能量，使漆膜更快表干以提升抗流挂性，同时需平衡其对外观的影响）；在配方设计或批次管控中，确保涂料具有适当的施工粘度和足量的抗流挂助剂；始终将各涂层膜厚严格控制在工艺标准范围内[6]。

3.4 溶剂点问题分析与解决

溶剂点是指在面漆喷涂过程中，微量的稀释剂或溶剂滴落于未固化的湿漆膜表面，因其对漆膜的局部溶解与表面张力作用形成圆形凹陷缺陷[7]，其典型形貌如图 12 所示。该缺陷对使生产线一次交验合格率降低 2.6%，日均导致 22 台车返修，并造成精修线拥堵 24 min。溶剂点在车身上出现位置分布如图 13 所示。

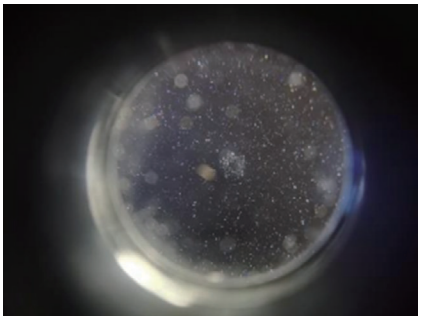


图 12 溶剂点状态

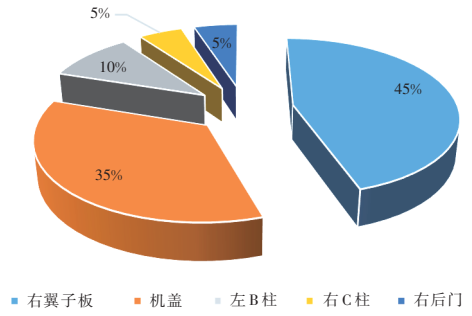


图 13 溶剂点位置分布

由图 13 可知，溶剂点主要分布于右翼子板、发动机舱盖、左 B 柱、右 C 柱及右后门等区域。该缺陷的产生大多与喷涂机器人的雾化器（旋杯或喷枪）密封不良有关，在高速旋转或运行过程中，可能将内部的溶剂微量甩出并滴落至车身表面。因此，解决此类问题的关键是根据产生溶剂点缺陷位置准确定位相应的喷涂机器人，对机器人雾化器进行检查及更换。溶剂点出现位置与特定喷涂机器人的映射关系如表 5 所示。

表 5 溶剂点位置与喷涂机器人的对应关系

溶剂点位置	喷涂机器人
右翼子板	清漆外板 R22
机盖	清漆外板 R12
左 B 柱	清漆外板 R12
右 C 柱	清漆外板 R24
右后门	清漆外板 R24

根据表 5 分析，5 个溶剂点问题位置对应 3 台面漆机器人，将 3 台机器人的雾化器进行更换，溶剂点缺陷对一次交验合格率的影响由 2.6% 下降至 1.0%，日均导致的精修线堵线时间由 24 min 下降至 8 min。溶剂点问题的解决提升了精修线一次交验合格率。

3.5 漆渣问题分析与解决

面漆漆渣主要包括色漆漆渣、清漆漆渣以及来源于输送滑橇的污染颗粒。精修线常见的色漆漆渣和清漆漆渣，主要指经过面漆机器人雾化后，未能充分雾化或固化前掉落并附着于湿漆膜表面的涂料颗粒，其附着在漆面上会破坏漆面的平整度与光泽，形成外观缺陷[8]。该问题使一次交验合格率降低 1.2%，日均导致 9 台车返修。色漆漆渣多发生于黑色车身，主要集中于右翼子板、右侧车门

和右后围区域。漆渣的具体形态如图14所示。

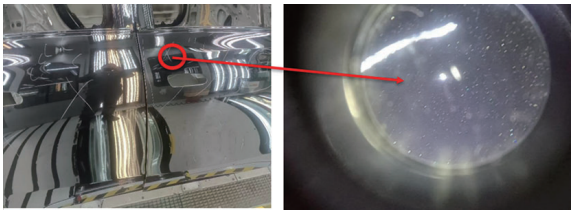


图14　色漆漆渣状态

漆渣的产生与喷涂机器人的运行状态及系统清洁度密切相关。分析发现,色漆漆渣的发生区域恰好对应于色漆外板机器人R23的喷涂范围。针对此问题,对该机器人喷涂单元执行了为期3 min的专用溶剂冲洗流程,并更换雾化器。采取上述措施后,后续生产车辆未发现同类色漆漆渣缺陷。

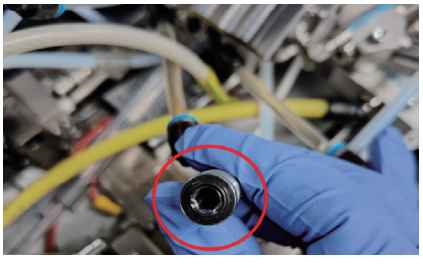
清漆漆渣集中出现在发动机舱盖左侧区域,该位置属于清漆外板机器人R12的喷涂覆盖区。为查明原因,对该机器人的供漆管路系统进行了拆卸检查。结果发现,在清漆管路入口、固化剂管路入口、齿轮泵的进出口以及靠近雾化器的法兰盘等关键部位,均堆积有部分漆渣,具体状态如图15所示。



(a)机器人清漆管路入口漆渣



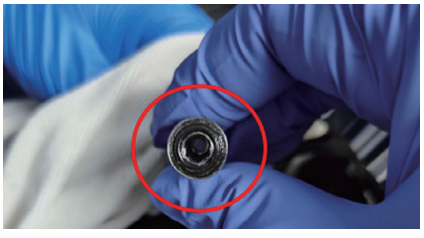
(b)机器人固化剂管路入口漆渣



(c)齿轮泵清漆管路入口漆渣



(d)齿轮泵清漆管路出口漆渣



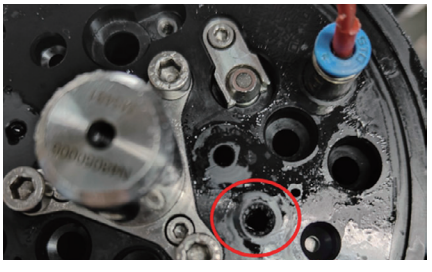
(e)齿轮泵固化剂管路入口漆渣



(f)齿轮泵固化剂管路出口漆渣



(g)雾化器混合后管路漆渣



(h)法兰盘雾化器端出口漆渣

图15　清漆漆渣状态

为系统性降低漆渣发生率,保障一次交验合格率的持续提升,需强化对面漆机器人系统的全员预防性维护(Total Productive Maintenance,TPM)以减少色漆及清漆漆渣,降低漆渣问题对一次交验合格率的影响。具体措施为提高与漆渣问题直接相关的关键维护项目的检查与清洁频率,优化方案如表6所示。

表6 漆渣问题相关TPM项目检查频次提升

序号	维护项目	优化前检查频次	优化后检查频次
1	管路检查	1次/4周	1次/1周
2	齿轮泵检查	1次/2周	1次/1周
3	雾化器检查	1次/2周	1次/1周

通过提高机器人工艺管路、齿轮泵、雾化器等关键设备部件的全员预防性维护频次，有效减少了系统内部涂料残留与固化积聚的风险。实施优化后，漆渣问题对一次交验合格率的影响由优化前的1.2%下降至0.8%，因此造成的精修线日均拥堵时间由9 min降低至7 min，有效改善了精修线质量状况。

4 精修线一次交验合格率提升成效

应用MRS质量分析软件对精修线质量状态进行持续监控与分析，明确了影响一次交验合格率的核心缺陷类型为缩孔、杂漆、流漆、溶剂点及漆渣。针对上述缺陷，通过真因分析制定并实施了长期解决措施。优化前，较低的一次交验合格率导致点修补缓冲区车辆积压严重，频繁引发精修线主线拥堵。通过系列改进，该问题得到有效缓解，因面漆缺陷导致的堵线时间显著下降。一次交验合格率的提升直接改善了精修线向下游工序（如发泡、注蜡）的供车节拍稳定性，相关工位的空线等待现象已完全消除。精修线一次交验合格率提升的成效量化对比如表7所示。

表7 精修线一次交验合格率提升成效果

内容		优化前	优化后
一次交验合格率/%		79	91
一次交验合格率主要影响因素	缩孔/%	8.3	3.2
	杂漆/%	5.1	2.1
	流漆/%	3.8	1.9
	溶剂点/%	2.6	1.0
	漆渣/%	1.2	0.8
日均堵线时间/min		174	66
日均点补工作时间/min		1 278	603

5 结束语

本文对精修线一次交验合格率影响因素进行了研究，通过对缩孔、杂漆、流漆、溶剂点、漆渣等面漆缺陷的根本原因分析，有效降低了各类缺陷的发生率，最终实现了精修线一次交验合格率由79%提升至91%。

本研究通过红外光谱分析等技术手段，锁定了导致缩孔的污染物源为含氟高温润滑脂，并通过更换为不含氟润滑脂从源头予以控制。通过优化生产排序、实施颜色分组喷涂，降低了换色频次，从而减少了杂漆缺陷。针对流漆问题，综合采取了设备精准维护、白车身表面质量管控及涂料粘度监控等措施。对于溶剂点与漆渣缺陷，通过更换故障雾化器、加强管路系统清洁以及提升关键部件预防性维护频率等方法有效解决。

漆面质量同主辅料状态及设备运行情况密切相关。要进一步完善进入车间化学品检测流程方法，避免影响面漆质量的化学品进入车间。优化对喷涂机器人及供漆系统关键备件的生命周期管理，完善更换标准与采购流程，在保证质量与供应的同时控制成本。将本次改善措施标准化、制度化，确保一次交验合格率长期稳定在较高水平。

参考文献：

[1] 彭小龙. 汽车喷涂作业中常见的漆面缺陷及预防措施[J]. 汽车维护与修理, 2015(9): 80-82.

[2] 杨东, 冯娜. 汽车涂装缩孔缺陷分析及改善[J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(7): 34-36.

[3] 金靖鹏, 杨志伟. 喷漆车间常见缩孔缺陷及对策[J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(9): 58-60.

[4] 苏晓卫, 王冰. 机器人喷涂杂漆质量问题探讨[J]. 现代涂料与涂装, 2015, 18(4): 65-66.

[5] 杜涛, 李晓君, 潘明明. 数据分析在涂膜问题解决中的运——一例漆面流漆问题的解决方案[J]. 中国涂料, 2020, 35(12): 28-32+59.

[6] 余海彬. 保险杠静电喷涂中尖角滴漆的分析及解决方案[J]. 现代涂料与涂装, 2020, 23(4): 69-72.

[7] 王海丰, 王兵, 许能才, 等. 汽车车身清漆漆点问题的原因与对策[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(4): 272-274.

[8] 李敏强, 林鹤川. 浅谈面漆漆渣缺陷[J]. 上海涂料, 2023, 61(3): 90-93.

AT&M