

粉末涂装因“巧合”产生的问题

王 戈

(正星科技股份有限公司, 郑州 450001)

摘要: 本文列举了在涂装生产实践中出现的4种多因素共同作用出现的所谓“巧合”问题,如磷化工件因钢板材料本身原因和清洗后滞空时间长产生的白锈问题、烘干工件因极端低温天气和烘干炉温度不到100℃以及烘干炉内有燃烧水蒸气产生水汽凝结成积水问题、因两个供应商粉末配方不同但在相同固化工艺条件下烘烤固化而产生的打印油墨脱落问题,以及因处理批量麻点缺陷生产线停顿导致工件停在炉内长时间过度烘烤导致的复喷工件涂层脱离等问题。多种因素共同作用产生的“巧合”问题,改变任意条件即可,但分析查找全部因素较为困难,会被表面的因素遮蔽。

关键词: 粉末涂装; 问题; 巧合; 多因素缺陷

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2026)03-0027-04

Coincidental Defects in Powder Coating Process

WANG Ge

(Censtar Science & Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This section presents four so-called "coincidental" quality issues observed in coating production, each resulting from the combined effects of multiple factors. White rust on phosphated parts is caused by the inherent characteristics of the steel material combined with prolonged air-exposure time after cleaning; Water accumulation in the drying oven is resulting from a combination of extreme low ambient temperatures, oven temperatures failing to reach 100 °C, and water vapor condensation generated by combustion; Ink detachment occurred when powders from two different suppliers, which have different formulations, are baked and cured under the same process conditions; Coating delamination on re-sprayed parts is caused by over-baking. This occurred because the production line halted to address batch pitting defects, leaving the parts inside the oven for an extended period. These "coincidental" problems, driven by multiple interacting factors, can often be resolved by altering just one condition. However, identifying and analyzing all contributing factors is challenging, as they are frequently masked by superficial symptoms.

Key words: powder coating; defect; coincidence; defects by multivariable condition

0 引言

所谓巧合问题实际是多因素共同作用的结果。产生此类问题时,只有找到了所有因素才能使问题获得解决。共同作用的因素中,有的比较隐蔽,或因条件限制需通过长时间观察、对比试验等才能找全它们。所

以不轻易下结论是解决疑难涂装问题的原则,以免片面的结论导致相关部门的误解,产生矛盾,而问题依旧存在。只有当通过试验方法反复使问题获得重现时,才能确定这些共同作用的因素。只有当从试验上获得重现、从理论上获得圆满解释后,才能说该问题已经解决。以下是生产中产生的数种质量问题,符合“巧合”的特征。

1 磷化工件产生白锈

工件喷涂后出现针孔缺陷,继而观察到当钢板磷

收稿日期: 2024-06-25

作者简介: 王戈(1966—),男,硕士,高级工程师,主要从事粉末涂料涂装工艺研究工作。E-mail: 2436835097@qq.com。

化膜产生白锈时,即便完全打磨也不能完全消除针孔缺陷。

影响槽浸式磷化结果的因素很多,脱脂、水洗、表调、磷化以及温度、时间、浓度等都是可能的原因。通过观察发现,有时同一车工件也会表现出不同的情况:有的磷化正常,有的出现白锈,甚至在组合焊接的工件不同部位也有不同的磷化效果。由此,确定不同的钢板会产生磷化白锈。

由于缺少检验钢板的手段,两种钢板的差异无法从来料检验上加以区别。仅从外观对比看,不同的钢板颜色会有差异:有白亮银色的,有灰暗颜色的。而灰暗的颜色也会有深浅不同,即从银亮到灰暗是连续的过渡,并没有截然不同的界限和标准。甚至有时灰暗银色钢板制成的工件表现为油污大,不易脱脂干净。影响因素除脱脂外还有表面调整和磷化液及清洗水等因素^[1-4]。

连续跟踪灰暗银色钢板工件,并非所有都会出现磷化后的白锈现象。

仔细对比这些工件,发现处于溶液上部的部位易出现白锈的迹象。进而得知:上部首先从溶液和水中出来,并先行干燥,这个先行干燥或与空气接触的地方是不是因氧化而不同?

用灰暗钢板制作试验件,故意拉长从脱脂后水洗到进入磷化槽液的时间,得到了不同的结果:白亮的钢板在正常工艺时间 3 min 表现正常;灰暗钢板的工件在空气中留置时间从 1 min 到 3 min,可以看到这类钢板表面开始出现不同程度的锈点,时间延长,锈点会连成一片,将含锈的样板进行磷化后出现白锈。

磷化工件白锈问题通过严格控制脱脂后水洗到进入磷化槽前的时间小于 180 s 而得到解决。

这里的巧合在于:钢板易于氧化生锈属于原料问题;脱脂后水洗过程暴露时间长导致氧化是操作方法问题。当该钢板碰巧遇到较长的操作时间(例如工件掉落处理等)时,质量问题就出现了,不是单一的原因。

钢板颜色的不同预示着某些特性的不同。钢板开包后表现为外观颜色的差异,有亮和暗之分;在折弯时可能表现为角度的差异;边角料表现为遇雨生锈的难易程度;灰暗钢板脱脂水洗后放置时间稍长表面即产生锈点并连成一片;生锈的产物磷化时锈蚀转化为白锈。

2 烘干后出现水分

2023 年 12 月,在涂装中发现工件内部有涂层撕裂情况,与角落存水的表现相同;继续观察发现烘干后工件内部仍有水分,因此怀疑工件烘烤前存留过多

的清洗水或烘烤温度不够。

在后续的生产中,也发现距离烘干炉较近的手动喷室生产的非白色工件(如银色),在冬季会出现工件边缘有气泡的情况;而离烘干炉较远的喷涂白色工件,不会出现边缘气泡问题。或者在复喷工件时,工件上出现气泡,到某一时间后气泡又逐渐消失。

对问题进行分析,除银色粉末本身因边缘较厚容易出现气泡外,工件干燥不充分也是问题原因之一。槽式前处理在冬季要开启蒸气加热,将工件烫干。烫干温度过低,工件不易干燥,甚至过夜后第二天表面依旧潮湿,工件存水的内部会有清洗水存留。升高烫干温度,充分烫干后依然会产生气泡等缺陷。

经烘干炉干燥后,工件内部角落残留液态水的部位出现涂层无法覆盖的情况。上下坡时,水从缝隙渗到外部,产生漏底缺陷。仅从前处理温度、烘干温度单方面观测不能确定原因。

继续跟踪发现情况远不是这么简单。前一天现场存留的磷化工件已经没有水分,但经过烘干后却出现了积水,也就是说,工件在烘干炉内“制造”了水,这种现象与烘干炉的作用完全相反^[5-7]。

持续进入烘干炉内观察,发现工件在进入烘干炉口时表面已开始变潮湿,继而有水珠顺着工件流下,在工件下部聚集。当工件从烘干炉出来后,下部积存的水仍然不干,即烘干炉“制造”了水。

原来,冬季天气异常寒冷,户外温度达到 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$,车间内的温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而烘干炉是借用固化炉燃气尾气直排进入的方式加热,部分尾气通过开裂的传热壁板进入烘干炉内,即烘干炉内存在水蒸气。

低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工件进入低于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘干炉(炉口温度更低),水蒸气在工件上凝聚成水流聚集在底部。工件缓慢升温,从烘干炉出来时,底部的存水不能充分烘干(图 1)。



图 1 烘干炉内蒸气在极低温度的工件上凝结成水流

此种情况出现是巧合,原因在于:异常的低温环

境、烘干炉温度不够高、炉壁开裂、烘干炉内有燃烧产生的水蒸气。

除了积水造成内部角落涂层开裂外,潮湿的工件,特别是潮湿的工件边缘,在距离烘干炉 10 m 的手动喷室喷涂银色粉末(铝粉颜料)时易在边缘产生气泡。白色喷室距离烘干炉 30 m,温热的工件上的水分继续挥发干燥,白色粉末涂层不会出现工件在烘干炉内“返潮”产生的涂层问题,这不是银色粉末与白色粉末本身差异的原因。

3 涂层丝印脱墨

QT 厂家供应的白色粉末,在丝网印刷 LOGO 时有油墨脱落的情况;PY 厂家的白色粉末,在丝印时性能很好。

通过试验不同固化能量方案发现,PY 的粉末在 200 ℃下,烘烤 2 min 油墨即不会脱落。QT 的粉末,需在 220 ℃烘烤 10 min 油墨才不会脱落,有温度提高油墨附着力的趋势(图 2)。而喷涂工艺要求在 200 ℃烘烤 10 min,涂层性能合格。

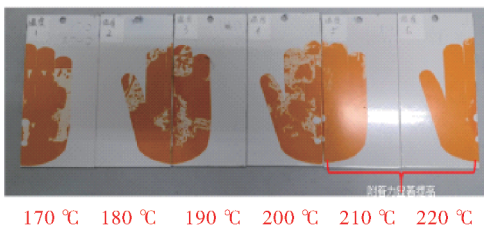


图 2 QT 原配方白粉末温度越高油墨附着力越好

此两种不同厂家的粉末涂料在相同生产线上以相同速度、温度条件下得到不同的油墨附着力效果。最终,要求 QT 厂家优化粉末配方,在工艺温度和速度下改善油墨的附着力。

同一 PY 厂家的另一型号 RAL7035 皱纹粉末,在打印 LOGO 时有光固化油墨脱起的情况。而这些粉末在来料检验时使用溶剂型油墨,较少发生油墨脱起情况。打印前的临时解决方案是,在打印字体图案处先用 718 溶剂擦拭表面,改变涂层的表面状态。

试验发现,RAL7035 皱纹型粉末在 200 ℃固化 4 min 有较好的打印油墨附着性能,温度越高打印油墨脱起越严重,有温度越高油墨附着力越差的趋势,即在给定温度速度的生产线固化条件下,使用 200 ℃烘烤 10 min 工艺,不能满足涂层的性能要求。

试验发现,RAL7035 皱纹型粉末在 200 ℃固化 10 min 时,对打印的光固化油墨和丝印的溶剂型油墨表现不同(图 3),与白色粉末得出的油墨无影响结论不同。

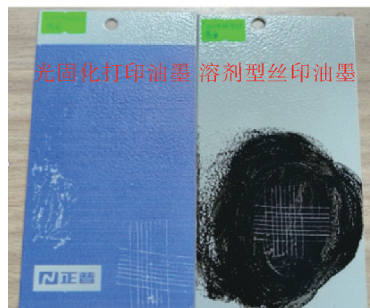


图 3 相同涂层的蓝色光固化打印油墨和黑色溶剂型油墨附着力出现差异

PY 厂家 RAL7035 粉末也供应其他厂家,但不使用打印 LOGO 的后续处理,没有出现油墨脱起现象。优化后的配方适用于目前生产线固化工序,在打印 LOGO 时无脱墨情况。

油墨脱起的巧合因素有:主要原材料差异的不同厂家的粉末或使用助剂不同的同一厂家不同型号的粉末或采用光固化和溶剂挥发型 LOGO 图案的不同油墨,但使用相同的 200 ℃ 10 min 生产线粉末固化工序^[9],而粉末来料检验只采取溶剂型油墨试验无法区分涂层的细微差别,在混合应用时就出现了油墨脱起的质量问题。

表面看两家粉末不同产生了丝印 LOGO 的脱墨问题,实际是两个厂家对使用方标准执行不一致造成,因粉末生产方并没有 LOGO 油墨和相应的涂覆设备对该性能进行检验。使用者要求“200 ℃、10 min”的固化工艺是唯一的判断标准,需由此调整配方。此外,即便均按照此工艺调整,各自的实验室固化炉采用电加热间歇方式,生产多采用连续的燃气加热,控制温度和升温曲线、工件上温度保持时间等都不尽相同,就又产生了供需双方的工艺、质量条件磨合的问题。

从脱落情况看,不同油墨的附着力和油墨的不同涂覆方式也有差异。打印油墨是光固化工艺,油墨是秒干的,漏网丝印要靠自然晾干,等待溶剂挥发。两种油墨的溶剂对涂层的侵蚀程度不同,导致结合力不同,漏网丝印油墨附着力更好。实际在处理油墨附着不合格工件时,先用溶剂擦拭打印部位,即可改善并让步使用。

再巧合到粉末的来料检验环节,因打印 LOGO 的设备开机时间问题,粉末来料常使用漏网丝印检验。导致来料检验和正常生产的质量结果不一致。

4 涂层脱落问题

黑色涂装工件在使用时发现涂层脱落情况,用刀片划开后,涂层能整片揭起(图 4),这些涂层脱落的工件为复喷件。

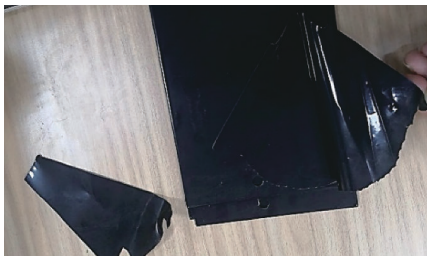


图4 首涂层经长时间烘烤后复喷层整层脱落,打磨处结合良好

正常磷化后涂装的工件不会发生此类问题^[9-10]。同时生产的白色喷涂两遍(即有两道同样的涂层,第一遍喷涂后不打磨)的工件没有问题;正常返工复喷的工件亦没有此问题,发现涂层掉落的工件在打磨处也不会掉落。

经职工回忆,黑色工件在喷涂时出现了大量的麻点。处理麻点问题需要停线清理粉末,而部分工件停留在固化炉内。因清理粉末时间过长约有30 min,工件在炉内220℃温度下烘烤过度。

这些工件在复喷时,只打磨了产生麻点的地方,其他地方不打磨。过度烘烤的涂层比正常涂层具有不同的界面,打磨破坏了底层涂层表面,产生的细密纹路增强了复喷层与底层的结合力。

此类涂层脱落巧合问题有这几个因素:麻点异常、停线、工件在高温炉内烘烤时间长、麻点缺陷造成的复喷工件多、工件表面未全部打磨。

油墨层脱起和复喷涂层脱起说明,过度烘烤是产生界面间附着力不佳的重要原因。遇到界面间结合力不好,要首先考虑过度烘烤问题,用不同的能量组合方案加以验证,即:固定工艺温度,做工艺时间前后不同时长的验证;或固定工艺时间,做工艺温度上下的验证。以此排除烘烤条件的因素。

工件的过度烘烤经常发生。固化温度设定高,是要满足“工件上保温200℃10 min”的工艺条件,而不是“工件在200℃的固化炉内运行10 min”,与生产线运行速度和温度设定直接相关;

另一过度烘烤发生于生产线慢速运行如需要手动喷涂的工件,和生产线停顿维修环节。在手动喷涂需要降低生产线速度时,需同时降低固化炉温度。数分钟的慢速不至于造成过度烘烤,超过30 min或更长时段的连续慢速会产生白色及浅色工件的黄色变化,相邻工件间的变化不易观察,仪器测试色差会有差异。

生产线的维修在于停机时间的不确定性,当生产线需要停线时,要首先关闭固化加热热源,以保护仍在高温炉内的工件。生产设备故障排除,再升高到工

艺温度。

粉末配方不同造成的过度烘烤仍涉及工艺标准的统一性。温度显著影响涂层界面状态,是涉及各种附着力的重要参数。

多种因素同时作用造成涂层脱落,巧合的机会不多,但不同的涂装厂家的产品总会出现,甚至出现市场产品涂层脱落遭遇大范围退货、维修事件,产生的质量损失严重影响企业效益。

5 结语

从事涂装工作时间越长,会遇到各种各样的巧合情况。所谓巧合实际是多种因素共同作用的现象,巧合产生的结果又是必然的。

当某些巧合遇到人的操作因素时,往往错被定义为人的故意而为,或未按规定操作,将客观的因素落实到人的操作方面,对职工是极大的伤害。在遇到无法解释的情况时,不能匆忙下一个结论只为对问题画一个句号,必须给予足够长的时间或充足的试验重现条件,理论不能圆满解释的,不能给出结论性意见。

对巧合产生的问题,其难点在于分析这些因素,而解决此类问题只要解决其中一个因素即可,看哪个更为容易、更为经济。

参考文献:

- [1] 王恩生,陈梅.磷化液在使用中的一些误区[J].现代涂料与涂装,2015,18(2):41-49.
- [2] 肖相鹏,李志军,王晓丽,等.喷粉前处理采用免水洗碱性硅烷工艺应用研究[J].现代涂料与涂装,2024,27(3):52-55.
- [3] 王绍明.新型磷化表面调整剂[J].电镀与环保,2005,25(6):19-20.
- [4] 王戈.极致用水——涂装前处理的“6Y”节水技术[J].现代涂料与涂装,2023,26(10):57-60.
- [5] 尹正宏,睦军燕,汪金奇,等.环境温度对铁路客车涂装质量的影响[J].现代涂料与涂装,2015,18(2):59-60.
- [6] 王云龙,牟浩伟,薛俊琦,等.汽车涂装烘干设备节能减排方法浅析[J].现代涂料与涂装,2023,26(10):43-60.
- [7] 赵光麟.涂装设备简明设计手册[M].北京:化学工业出版社,2012:97-101.
- [8] 王戈.产品涂装防护的局部缺陷[J].现代涂料与涂装,2020,23(6):33-40.
- [9] 李世军,张海华,胡美芳.粉末涂装附着力不良原因浅析[J].现代涂料与涂装,2024,27(9):43-45.
- [10] 彭杨,周究民,张蕾,等.汽车轻量化材料表面处理技术创新研究[J].现代涂料与涂装,2024,27(7):49-52.