

基于 6 σ 的手机外壳阳极氧化中 异色发白不良因子改善方案

王秀红, 许博蕴, 葛庆洋

(郑州航空工业管理学院, 郑州 450015)

摘要: **目的** 降低铝合金手机外壳阳极异色发白不良品率。**方法** 基于 6 σ 管理中的 DMAIC 体系, 结合某款手机外壳加工工艺, 根据返工流程图和关键因子的因果关系图, 制作出因子 CE 矩阵并进行 PFMEA 分析, 确定 R400 酸洗槽中的药剂浓度、超声波频率、槽液温度、浸泡时间、烘干槽中热风洁净度 5 个关键质量影响因素。采用五五研究法, 针对烘干槽空气滤芯不定期更换或是长期一个月以上不更换、吹出的热风洁净度低, 导致产品异色等问题, 制定空气滤芯更换时间标准。采用两水平四因子试验设计, 得出异色发白的不良率随药剂浓度的增大而增大, 随槽液温度、浸泡时间、超声波频率的增大而减小, 槽液温度和药剂浓度有交互作用。并设计了 R400 酸洗槽中的药剂浓度、超声波频率、槽液温度、浸泡时间四个因素的控制策略。**结果** 酸洗槽各参数的取值范围为: 药剂质量浓度 35~40 g/L, 超声波频率 3.5 A, 槽液温度 25~27 $^{\circ}\text{C}$, 浸泡时间 3.5~4 min。烘干槽更换时间规则: 每 15 d 更换一次, 每 5 d 检查空气滤芯的洁净度。**结论** 异色发白不良率由改善前的平均 6.63%降低至 1.14%, 达到了 2%的目标要求, 4 周成本降低 90 多万元。

关键词: 阳极异色发白; 6 σ ; DMAIC; 阳极氧化; 铝合金; 酸洗

中图分类号: TG174.451; F273.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0290-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.044

Improvement of Discolouring and Whitening Negative Factor in the Six Sigma-based Anodic Oxidation of Mobile Phone Shell

WANG Xiu-hong, XU Bo-yun, GE Qing-yang

(Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the negative discoloring and whitening rate of anode in aluminum alloy mobile phone shell. CE matrix of factor was prepared and PEMEA analysis was executed based on DMAIC system in six sigma management and processing technology of some certain mobile phone shell according to causal graph between rework flowchart and key factor. Then, 5 key quality influence factors were determined, including drug concentration, ultrasonic frequency, tank liquor temperature and soaking time R400 support pickling tank and hot air cleanliness in drying tank. Equally study method was adopted to solve problems like air filter element in drying tank not being regularly replaced or not replaced over one month, low cleanliness of blown hot air and discoloring of products and the replacement standard of air filter was prepared. Through

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2017-12-10

Received: 2017-11-01; Revised: 2017-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61203179); 河南省哲学社会科学规划项目 (2016BZH010); 河南省科技厅项目 (182102310951)

Fund: National Natural Science Foundation (61203179), Henan Philosophy and Social Science Planning Project (2016BZH010); Department of Science and Technology of Henan Province (182102310951)

作者简介: 王秀红 (1974—), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为技术创新。

Biography: WANG Xiu-hong (1974—), Female, Doctor, Professor, Research focus: technology innovation.

two-level four factorial experiment design, the negative discoloring and whitening rate increased as the drug concentration went up, but decreased along with increase of tank liquor temperature, soaking time and ultrasonic frequency increase. Tank liquor temperature and drug concentration were interacted. Then, the control strategy of the drug concentration, ultrasonic frequency, tank liquor temperature and soaking time of the R400 support pickling tank was designed. The range of each parameter of pickling tank: drug concentration from 35 g/L to 40 g/L, ultrasonic frequency 3.5 A, tank liquor temperature from 25 °C to 27 °C and soaking time from 3.5 min to 4 min. The rules on replacement time of the drying tank: replacement every 15 days and inspection for cleanliness of air filter element every 5 days. The negative discoloring and whitening rate drops to 1.14% from 6.63% before the improvement and reaches the target of 2%. Cost decreased by more than 900,000 Yuan for 4 weeks.

KEY WORDS: anode discoloring and whitening; 6σ; DMAIC; anodic oxidation; aluminum alloy; pickling

铝合金手机外壳生产中,需要进行染色和氧化处理,以达到装饰美观和抗腐蚀效果,但有时会出现表面区域色泽差异、两侧有白色斑点等不良品,简称异色发白。对某款手机不良品统计发现,异色发白占外壳总不良率的 60%~70%,占手机总产品不良率的 6.63%,主要原因是染色和氧化制程复杂,涉及近百道工序,数百个影响因子,而在实际生产中,一些主要参数值的确定,如酸洗槽药剂浓度、槽液温度、反应时间、超声波频率等主要依靠操作人员的经验来定。目前,还没有学者专门研究上述问题。

姜宏^[1]采用正交实验法研究了手机涂装制程中存在的色差问题,使用过程能力指数对涂装色差制程能力进行评估,但色差只占外壳总不良品的 10%左右。邓银等^[2]对印制电路板表面涂覆工艺的异色发白问题进行了研究,但针对的是铜面工艺。徐永等^[3]研究了外壳涂装中的漆膜发白及局部出现应力纹、橘皮等问题,但针对的手机外壳是塑件。此外,王平等^[4]对铝合金硬质阳极氧化过程中氧化面产生大量气泡的问题进行了研究。

本文采用 6σ 管理^[5]中的 DMAIC 体系解决异色发白问题。DMAIC 模型是实施 6σ 的一套操作方法,通过对系统进行定义(Define)、测量(Measure)、分析(Analyze)、改进(Improve)和控制(Control),消除系统缺陷和无价值作业,从而提高质量,降低成本^[6,7]。即通过 CE 矩阵、PFMEA 分析等方法筛选出关键因子,采用试验设计找出最优加工参数,建立智能化、自动化管控系统,力求使异色发白不良率降低至 2%。

1 系统定义及改善目标

1.1 系统定义

氧化、染色处理工艺分为阳极 1、阳极 2 和喷沙三大制程,近百个小制程,其中阳极 1 是对铝合金 HSG 进行氧化,阳极 2 是对铝合金 HSG 进行染色。对表面二厂阳极车间往期的 402、502 产品各制程共 6 个月的不良率进行统计,结果如图 1 和图 2 所示。

可以看出,阳极 1 在三大制程中不良率最高,在两种产品中,阳极 1 不良率是阳极 2 的 2 倍以上,是喷砂制程的 7 倍以上。进一步统计同一时段的阳极 1 的各不良项,结果见表 1,可知,阳极 1 中异色发白在各不良项中占比最大,在 402 产品中,平均占 61%,而在 502 产品中,平均达到 72%。

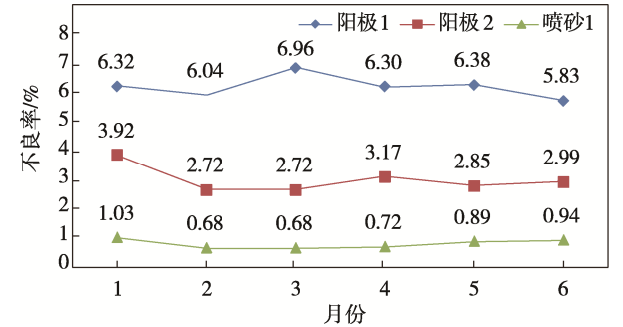


图 1 402 产品不良项
Fig.1 Undesirable items of 402 product

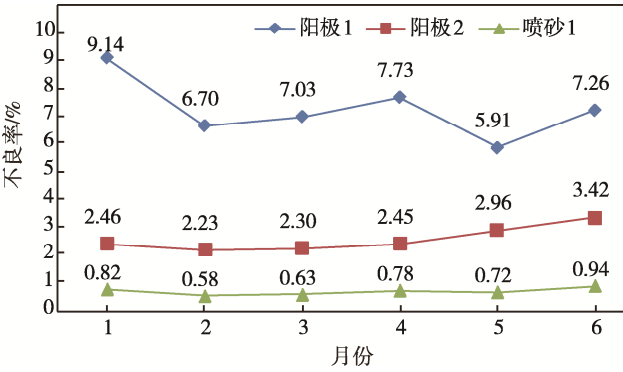


图 2 502 产品不良项
Fig.2 Undesirable items of 502 product

表 1 产品阳极 1 的各不良项
Tab.1 Undesirable items of anode 1 in product

产品	不良率/%				
	发白	异色	色差	光环	其他
402	21	40	11	18	10
502	30	42	9	13	6

1.2 改善目标确定

产品出现异色发白现象,则需要返工,返工流程及各个制程的加工费如图 3,单位为元/件。改善目标

设定为把异色发白不良率由现在的平均 6.63%降低到 2%。计划日产量 $D=62660\text{Pcs}$,则每日可节省成本 $Y=62660\times 9.87\times (6.63\%-2\%)=28634.4$ (元)。

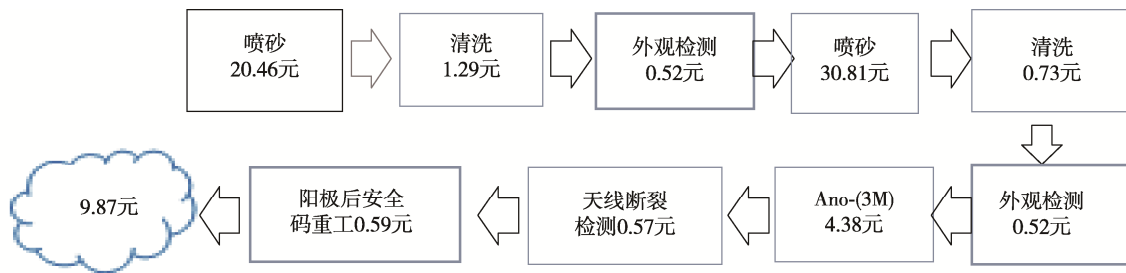


图 3 返工流程图
Fig.3 Rework flow chart

2 测量系统分析

2.1 MSA 实验设计方案

实验目的是检测测量系统是否合格有效。需求为: 3 位质检员, 1 位专家, 30 个样本, 做两次实验。实验步骤为: 1) 随机选择 30 个样本; 2) 由专家确认每个样本的合格与否; 3) 以随机顺序将样本放置在托盘中, 并由随机选出的 A 质检员检测, 记录一组数据; 4) 随机选出 B 质检员, 重复步骤 3 的动作, 记录第 2、3 组实验数据; 5) 重复步骤 3) 和 4) 的动作, 记录第 4、5、6 组实验数据。按照以上步骤进行实验, 并由 QC、生产、成本、检验员等相关责任人签字确认。

2.2 数据处理

Kappa 是认定系统一致性的一个标准, 其值大于 0.75 便可认为具有良好的一致性。用 Minitab 软件^[8]对数据进行处理, 量具运行图和评估一致性图分别为图 4 和 5。质检员 A 对同一产品有一次检验前后不一致, 质检员 B 对同一产品有两次检验结果不一致, 三位质检员自身一致性和与标准的一致性均在 90%以上。质检员自身的一致性、质检员之间的一致性、每个质检员与标准的一致性和所有质检员与标准的一致性这四项的 Kappa 值均大于 80%。据此可以认证该测量系统的重复性、再现性和检验员与标准的一致性良好, 说明该测量系统是合格的。

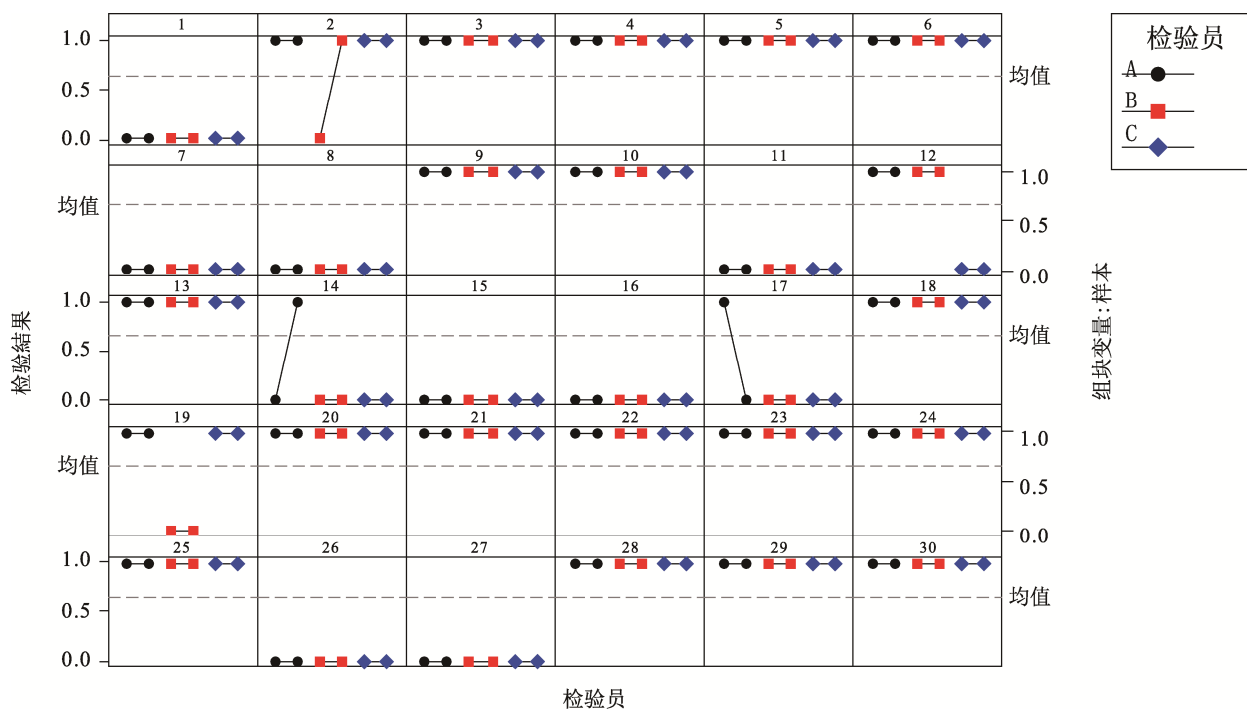


图 4 量具运行图
Fig.4 Gauge run chart

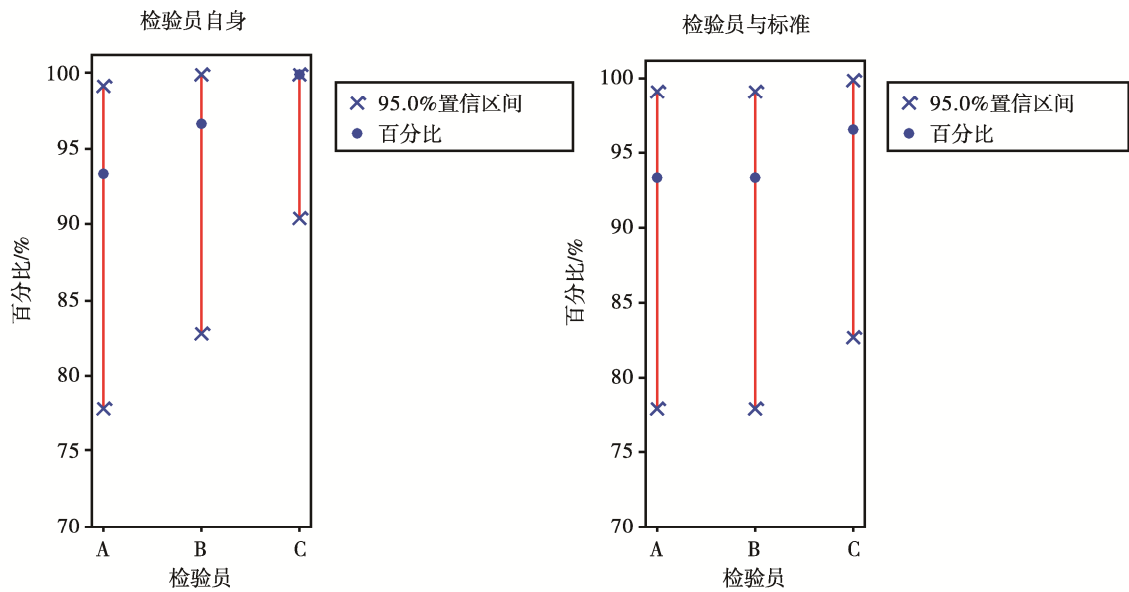


图 5 评估一致性图
Fig.5 Conformance assessment chart

3 原因分析

3.1 因果流程图

阳极 1 制程复杂，共有 51 道工序，数百个影响因子，见图 6 所示。考虑到时间和成本，如何从中筛

选出关键因子尤为重要。从图 6 可以看出，重点工序共 12 个，分别为脱脂 1、剥黑膜 1、化学抛光、剥黑膜 2、氧化、酸洗、脱脂 2、剥黑膜 3、染色、封孔、酸洗、烘干等。制作出每个重点工序的因果流程关系表，见表 2 所示。图中输入表示引起异色发白的因子，输出为需要的产品质量特性。

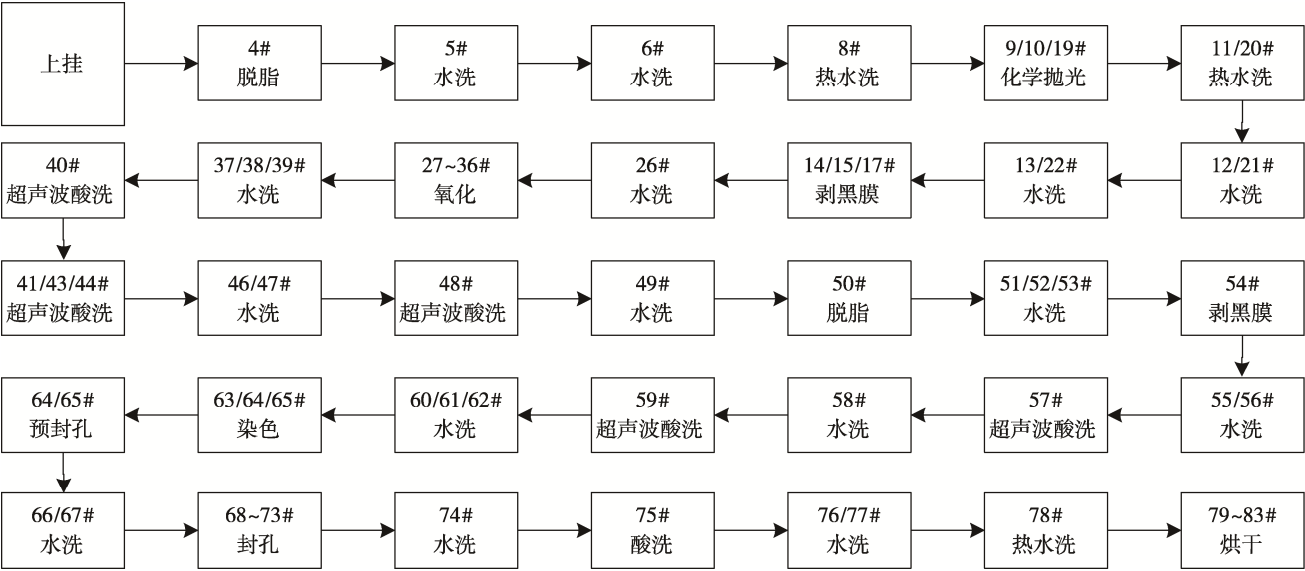


图 6 阳极 1 处理流程图
Fig.6 Flow chart for treatment of anode 1

3.2 CE 矩阵

根据表 2，制作出 CE 矩阵，请厂部的技术人员对这 5 项因素根据其重要程度按“1 分~10 分”分配权重。并对 CE 矩阵各项进行评分，分数选择按“0”、“1”、“3”、“9”

这四等分值，根据其影响的重要程度来评定，见表 3 所示。根据产品的质量特性，找出“干净的表面”、“表面光泽度”、“氧化膜厚度”、“表面平整度”、“表面颜色”5 项对产品质量影响最大的输出因子。

表 2 因果流程关系表
Tab.2 Causal flow relation

输入	类别	制程	输出	输入	类别	制程	输出
1 表面油污	N	脱脂 1	干净的表面	7 表面油污	N	脱脂 2	干净的表面
槽液温度	C			槽液温度	C		
浸泡时间	C			浸泡时间	C		
R105 浓度	C			R105 浓度	C		
2 表面污染	N	剥黑膜 1	干净的表面	8 表面污染	N	剥黑膜 3	干净的表面
槽液温度	C			槽液温度	C		
浸泡时间	C			浸泡时间	C		
HNO ₃ 浓度	C			HNO ₃ 浓度	C		
3 表面粗糙	N	化学抛光	平整的表面 表面有光泽	9 槽液温度	C	染色	玫瑰金色表面 表面有光泽
槽液温度	C			浸泡时间	C		
浸泡时间	C			染色药剂	C		
比重	C			pH	C		
4 表面污染	N	剥黑膜 2	干净的表面	10 槽液温度	C	封孔	表面平整光滑 染料不外漏
槽液温度	C			浸泡时间	C		
浸泡时间	C			R500 浓度	C		
HNO ₃ 浓度	C			pH	C		
5 槽液温度	C	氧化	氧化膜厚度 表面硬度 表面光滑	11 槽液温度	C	酸洗	干净的表面
浸泡时间	C			浸泡时间	C		
硫酸浓度	C			HNO ₃ 浓度	C		
铝离子浓度	C						
6 表面污染	N	酸洗	干净的表面	12 表面潮湿	N	烘干	干燥的表面
槽液温度	C			槽中温度	C		
浸泡时间	C			吹风时间	C		
药剂浓度	C						
pH	C						

表 3 CE 矩阵表
Tab.3 CE matrix

		干净表面	表面光泽度	氧化膜厚度	表面平整度	表面颜色	得分			干净表面	表面光泽度	氧化膜厚度	表面平整度	表面颜色	得分
		权重	10	1	1	4	10			权重	10	1	1	4	10
过程	输入变量							过程	输入变量						
脱脂	表面污染	9	9	0	3	0	111	染色	pH 值	0	1	1	1	9	96
	浓度	3	1	0	0	0	31		药剂浓度	1	1	1	1	3	46
	槽液温度	3	1	0	0	0	31		槽液温度	1	1	1	1	3	46
	浸泡时间	3	0	0	0	0	30		浸泡时间	1	1	1	1	9	106
剥黑膜	表面氧化膜	3	1	0	0	0	31	超声波清洗	表面污染	9	1	1	0	1	102
	表面污染	9	3	0	1	0	97		槽液温度	9	1	1	1	0	96
	药剂浓度	3	1	0	1	0	35		浸泡时间	9	1	1	1	0	96
	槽液温度	1	0	0	1	0	14		超声波频率	9	1	1	1	0	96
	浸泡时间	3	1	0	1	0	35		溢流调节	9	1	1	1	0	96

续表 3

过程								结果							
干净表面 表面光泽度 氧化膜厚度 表面平整度 表面颜色 得分								干净表面	表面光泽度	氧化膜厚度	表面平整度	表面颜色	得分		
权重								10	1	1	4	10			
过程	输入变量							过程	输入变量						
化学抛光	表面粗糙	1	3	0	3	0	25	封孔	pH 值	1	1	1	1	3	46
	槽液温度	3	9	0	3	0	51		药剂浓度	1	1	1	1	3	46
	浸泡时间	3	9	0	3	0	51		槽液温度	1	1	1	1	9	106
	比重	1	9	0	1	0	23		浸泡时间	1	1	1	1	3	46
阳极氧化	通电电压	1	3	9	9	3	88	封孔后酸洗	表面污染	3	1	1	1	3	66
	铝离子含量	0	0	3	3	1	25		pH 值	3	0	0	0	1	40
	药剂浓度	0	0	3	1	1	17		药剂浓度	3	1	0	0	1	41
	槽液温度	0	1	3	1	3	38		槽液温度	1	0	0	0	0	10
	浸泡时间	0	1	9	1	3	44		浸泡时间	3	0	0	0	1	40
R400酸洗	表面污染	9	1	1	1	3	126	烘干	表面潮湿	9	0	0	1	1	104
	pH 值	1	1	1	1	1	26		热风洁净度	9	1	0	0	3	121
	药剂浓度	9	1	1	1	3	126		热风温度	3	0	0	0	3	60
	槽液温度	9	1	1	1	1	106		吹风时间	3	0	0	0	1	40
	超声波频率	9	1	1	1	1	106								
	浸泡时间	9	1	1	1	3	126								

影响产品质量特性的 5 个输出因子中, 表征异色发白不良特性的输出因子“干净的表面”和“表面颜色”最为重要, 权重为 10。根据 CE 矩阵的评分计算结果, 选出表面污染、药剂浓度、槽液温度、超声波频率和浸泡时间等 10 项重要因子, 见表 3 中红字部分。在阳极氧化制程中, 有很多重要的参数, 如电压和电流等, 但从表 3 可以看出, 电压主要影响氧化膜的厚度, 对异色发白影响程度较低, 且实际生产中氧化膜厚度符合质量要求。而电流主要通过影响超声波频率来影响产品质量特性。

3.3 PFMEA 分析

将上述 10 个主要因子做 FMEA 分析。对选出的 10 个重要因子失效模式的重要度、发生率和监测能力这三项,其关联、重要程度按照“1~10”分进行评定,然后根据三项的乘积,选出分值最高的 5 项为关键因子,如表 4 所示。关键因子分别是: R400 酸洗槽中的药剂浓度、超声波频率、槽液温度、浸泡时间和烘干槽中热风洁净度。

表 4 FMEA 分析表
Tab.4 FMEA analysis

过程	输入	潜在失效模式	潜在失效影响	SEV	潜在的原因	OCC	当前管控方法	DET	RPN
R400 酸洗	表面污染	表面污染难清洗	产品脏污	8	来料脏污多	3	增加脱脂时间	4	96
		R400 残留	腐蚀氧化层	6	药剂清洗不彻底	5	增加纯水清洗时间	5	150
	药剂浓度	药剂浓度不合理	清洗不干净	9	药剂添加不及时	4	设定药剂浓度范围, 按时添加药剂	6	216
	超声波频率	频率能量不达标	清洗不干净	9	超声波仪器故障	3	监控超声波频率	9	243
	槽液温度	温度不合理	清洗不干净	8	槽液温度设定不合理	3	实时监控温度	9	216
	浸泡时间	浸泡时间不合理	产品脏污	9	浸泡时间设定不合理	3	监控浸泡时间在设定 范围内	7	189
烘干	表面潮湿	表面污染	产品异色	7	烘干机故障	4	检测烘干温度	5	140
	热风洁净度	热风不洁净	产品异色	7	空气滤芯脏污	4	定期更换滤芯	7	196
脱脂	表面污染	表面污染难清洗	产品脏污	6	表面油污杂质多	3	增加脱脂时间	5	90
染色	浸泡时间	浸泡时间不合理	染色不足或过度	6	浸泡时间设定不合理	4	重复染色或报废	6	144
封孔	槽液温度	槽液温度不合理	封孔不完全	6	槽液温度设定不合理	3	监控槽液温度 在设定范围内	7	126

4 改善

4.1 改善一：烘干槽空气滤芯

利用五五法^[9]研究烘干槽的热风洁净度问题，实施情况如下。

问：烘干槽空气滤芯多长时间更换一次？

答：不定期更换或一个月以上更换一次。

问：为什么不缩短时间或定期更换滤芯？

答：一直都是这么执行且没有相关的标准。

问：可以制定相关的时间标准吗？

答：可以。

问：如何确定合适的更换周期？

答：通过比较不同更换周期下的良率情况确定最佳周期。

问：确定周期后如何有效地实施？

答：由专人负责，定期检查，严格执行。

得出如下结果：改善前，烘干槽空气滤芯不定期更换，或是长期一个月以上不更换，吹出的热风脏污度较高，导致产品异色。改善后，制定空气滤芯更换时间标准，每 15 d 更换一次，严格执行，每 5 d 检查空气滤芯的洁净度。

4.2 改善二：调整 R400 酸洗槽的参数

采用两水平四因子试验设计^[10,11]求出阳极 1 制程 R400 超声波酸洗槽药剂浓度、槽液温度、反应时间、超声波频率等参数的最优值，以便进行调整。阳极 1 制程 R400 酸洗槽的当前参数见表 5（超声波频率用电流大小来控制，此处用电流符号表示频率）。

表 5 阳极 1 制程 R400 酸洗槽参数
Tab.5 Parameters of R400 pickling bath for processing anode 1

项目	药剂质量 浓度 (A) /(g·L ⁻¹)	槽液温 度 (B) /°C	反应时 间 (C) /min	电流 (超声 波频率) (D) /A
低水平 (L)-1	35	23	2.5	2
高水平 (H)+1	45	27	3.5	4

全因子实验设计：分别用 A、B、C、D 表示表 5 中的 4 个因子，制定四因子两水平的全因子实验计划安排如表 6 所示。部分因子设计：考虑到时间上的限制和节约成本，把 16 次实验缩减为 8 次，保留 ABCD 列中取 1 的八行，见表 7。

从表 7 可以看出，其分辨度为 IV，表明主效应之

表 6 全因子试验设计
Tab.6 Full factorial experimental design

实验号	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1

表 7 部分因子试验设计
Tab.7 Partial factorial experimental design

序号	实验号	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
2	4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
3	6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
4	7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
5	10	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
6	11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
7	13	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
8	16	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1

间没有混杂，主效应与二阶交互效应之间也没有混杂，主效应可能与某些三阶交互效应相混杂，某些二阶交互效应可能与其他二阶交互效应相混杂。混杂^[12]指完全相同的两列在数据处理的结果中，得到的效应和回归系数完全一样，如表 7 的 D 列和 ABC 列。根据随机化、重复化的原则安排 2 组实验，每组共进行 8 个实验，每个实验分别选取四个因子不同的水平，其中 H 表示高水平，L 表示低水平，见表 5 所示。实验先后顺序用 1—8 随机数字表示，安排试验如表 8，顺序收集的试验数据见表 9。

用 minitab 处理数据，得出不良率的主效应图、交互作用图和输出效应 Pareto 图，如图 7—图 9 所示。从图 7 可知，异色发白的不良率随药剂浓度的增大而增大，随槽液温度、浸泡时间和超声波频率的增大而减小。从图 8 可以看出，槽液温度和药剂浓度有交互作用。由图 9 可知，只有超声波频率和浸泡时间的主效应是显著的，槽液温度和浸泡时间以及二阶交互作用都是不显著的。

进一步给出输出效应的拟合、方差分析数据见表 10 和表 11。从表 10 和表 11 可知，槽液温度和药剂浓度的 *P* 值都大于 0.05。因此，接受原假设，认为槽液温度和药剂浓度的主效应不显著。剔除槽液温度和药剂浓度这两个效应不显著的因子，得到只有浸泡时

表 9 试验数据
Tab.9 Experimental data

序号	参数代号	药剂质量浓度	槽液温度	反应时间	电流(超声波频率)	实验 1/%	实验 2/%
1	HHHH	+1	+1	+1	+1	2.00	1.60
2	HHLL	+1	+1	-1	-1	7.50	8.50
3	HLHL	+1	-1	+1	-1	3.80	3.40
4	HLLH	+1	-1	-1	+1	3.80	4.20
5	LHHL	-1	+1	+1	-1	3.40	3.80
6	LHLH	-1	+1	-1	+1	2.30	2.30
7	LLHH	-1	-1	+1	+1	1.00	1.40
8	LLLL	-1	-1	-1	-1	8.50	9.50

间和超声波频率的简化模型。

简化模型的效应 Pareto 图、不良率估计效应和系数结果、不良率方差分析如图 10、表 12 和表 13。残差是模型拟合出的预测值和实际值的差^[13]。根据表 13，绘制图 11 的不良率的残差图。从图 11 可以看出，残差符合正态分布，残差和为零且没有明显的模式和趋势。该模型的残差符合模型有效的三个必要条件，

表 8 试验安排表
Tab.8 Experimental schedule

序号	质量浓度	温度	时间	电流（超声波频率）	实验组 1	实验组 2
1	H	H	H	H	3	8
2	H	H	L	L	5	3
3	H	L	H	L	6	1
4	H	L	L	H	1	5
5	L	H	H	L	2	4
6	L	H	L	H	4	2
7	L	L	H	H	8	7
8	L	L	L	L	7	6

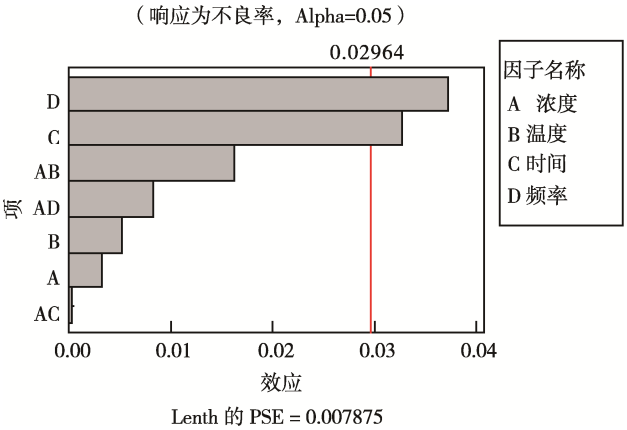


图 7 初始模型的效应 Pareto
Fig.7 Pareto diagram of initial model effect

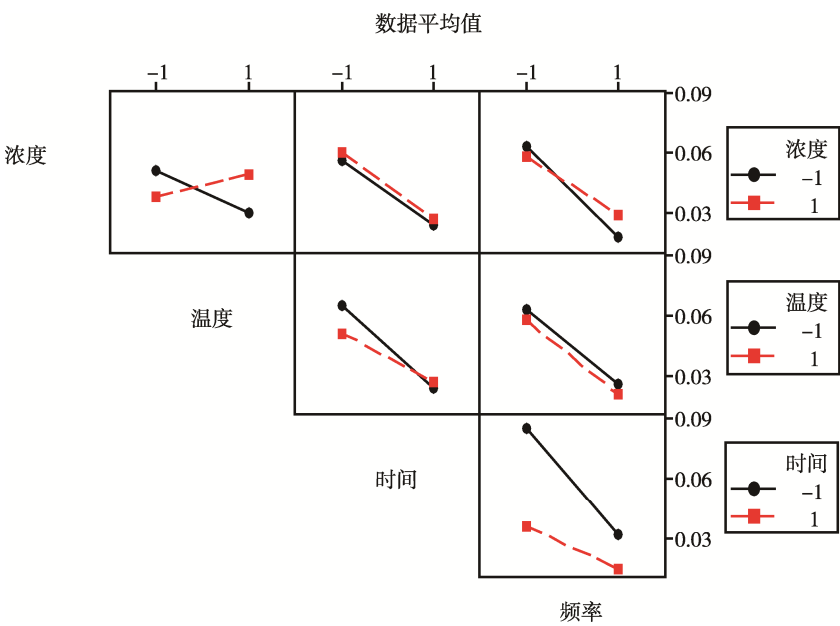


图 8 不良率交互作用图
Fig.8 Interaction diagram of adverse rate

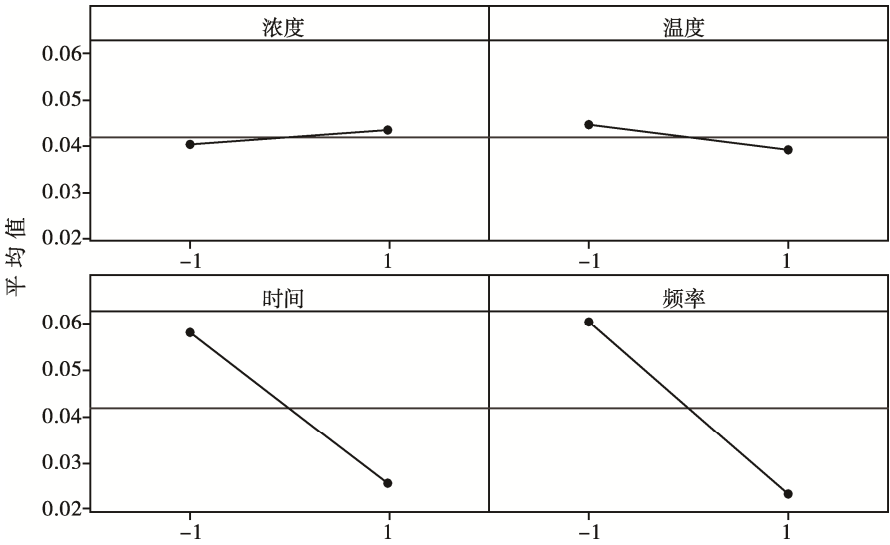


图 9 不良率主效应图
Fig.9 Main effect diagram of adverse rate

表 10 初始模型不良率的估计效应和系数表
Tab.10 Table for estimation effect and coefficient of adverse rate

项目	效应	系数	系数标准误	<i>T</i>	<i>P</i>
常量		-0.042 50	0.005 144	-8.26	0.004
浓度	-0.004 50	-0.002 25	0.005 144	-0.44	0.691
温度	-0.006 50	-0.003 25	0.005 144	-0.63	0.572
时间	-0.034 00	-0.017 00	0.005 144	-3.30	0.046
频率	-0.036 00	-0.018 00	0.005 144	-3.50	0.039
<i>S</i> =0.014 548 8 <i>PRESS</i> =0.004 515 56					
<i>R-Sq</i> =88.79% <i>R-Sq</i> (预测)=20.28% <i>R-Sq</i> (调整)=73.84%					

表 11 初始模型的不良率方差分析
Tab.11 Variance analysis for undesirable rate of the initial model

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	<i>F</i>	<i>P</i>
主效应	4	0.005 029 00	0.005 029 00	0.001 257 25	5.94	0.088
浓度	1	0.000 040 50	0.000 040 50	0.000 040 50	0.19	0.691
温度	1	0.000 084 50	0.000 084 50	0.000 084 50	0.40	0.572
时间	1	0.002 312 00	0.002 312 00	0.002 312 00	10.92	0.046
频率	1	0.002 592 00	0.002 592 00	0.002 592 00	12.25	0.039
残差误差	3	0.000 635 00	0.000 635 00	0.000 211 67		
合计	7	0.005 664 00				

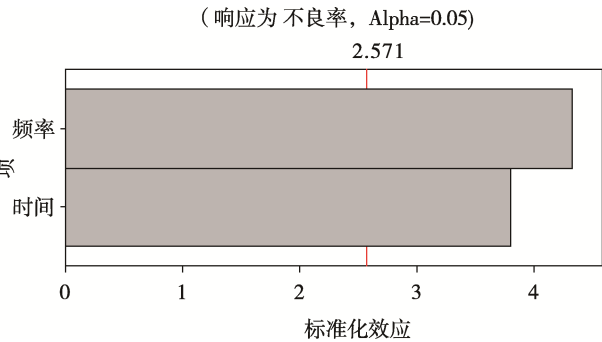


图 10 简化模型的效应 Pareto 图
Fig.10 Effect Pareto diagram of simplified model

表 12 简化模型的不良率估计效应和系数
Tab.12 Estimation effect and coefficient for adverse rate of simplified model

项目	效应	系数	系数标准误	<i>T</i>	<i>P</i>
常量	-0.00000	-0.041 88	0.004 303	-9.73	0.000
时间	-0.032 75	-0.016 37	0.004 303	-3.81	0.013
频率	-0.037 25	-0.018 62	0.004 303	-4.33	0.008
		<i>S</i> =0.0121707	<i>PRESS</i> =0.001 896		
		<i>R</i> -Sq=86.92%	<i>R</i> -Sq(预测)=66.51%		
		<i>R</i> -Sq(调整)=81.68%			

表 13 简化模型的不良率方差分析
Tab.13 Variance analysis for adverse rate of simplified model

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	<i>F</i>	<i>P</i>
主效应	2	0.004 920 2	0.004 920 2	0.002 460 12	16.61	0.006
时间	1	0.002 145 1	0.002 145 1	0.002 145 12	14.48	0.013
频率	1	0.002 775 1	0.002 775 1	0.002 775 12	18.74	0.008
残差误差	5	0.000 740 6	0.000 740 6	0.000 148 12		
失拟	1	0.000 528 1	0.000 528 1	0.000 528 12	9.94	0.034
纯误差	4	0.000 212 5	0.000 212 5	0.000 053 13		
合计	7	0.005 660				

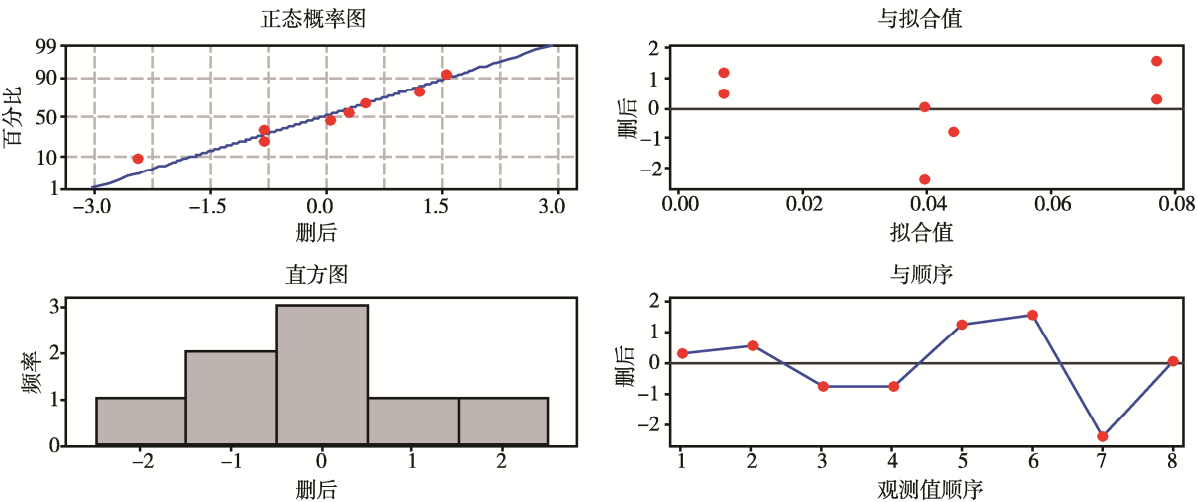


图 11 不良率的残差图
Fig.11 Residual plot of adverse rate

说明该模型有效的。从表 13 的方差分析可以看到,浸泡时间和超声波频率的 P 值都小于 0.05,拒绝原假设,认为浸泡时间和超声波频率主效应是显著的。

根据简化模型的不良率估计效应和系数图,求出浸泡时间和超声波频率的拟合系数和常量值。得出线性回归方程: $Y(\text{不良率})=0.04188-0.01637\times\text{时间}-0.01862\times\text{频率}$,利用方程,通过输入时间、频率的参数,可预测异色发白不良率。从不良率的主效应图、交互作用图和数学模型可以得出阳极 1 制程中 R400 酸洗这一工序中酸洗槽 4 项因子的最优参数为:药剂质量浓度 35 g/L,槽液温度 27 ℃,反应时间 3.5 min,电流(超声波频率)4 A。

5 控制

根据试验结果,调整阳极 1 制程中 R400 酸洗这一工序中酸洗槽的药剂浓度、槽液温度、反应时间、超声波频率的参数范围,如表 14 所示。随着工业 4.0 的发展^[14],企业自动化、智能化的推广^[15-16],我们预想建立一个智能化、标准化的管控系统,建立如图 12 所示的三大监控系统,目前已经建成了自动加药系统。

表 14 R400 参数调整表
Tab.14 R400 parameter adjustment

项目	药剂质量浓度/(g·L ⁻¹)	槽液温度/℃	反应时间/min	电流(超声波频率)/A
改善前	35~45	23~27	2.5~3.5	2~4
改善后	35~40	25~27	3.5	3.5~4

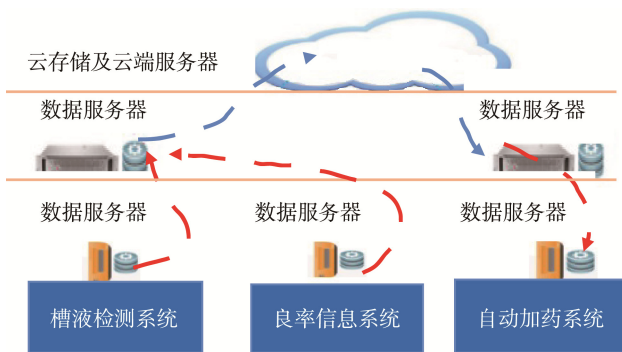


图 12 管控系统
Fig.12 Management and control system

利用表 14 调整制程 R400 酸洗槽参数,并统计四周外壳质量和总投入,见表 15 和图 13、14 所示。异色发白不良率由改善前的平均 6.63%降低至 4 周后的平均 1.14%,达到了 2%的目标要求,4 周成本降低 975 139 元。

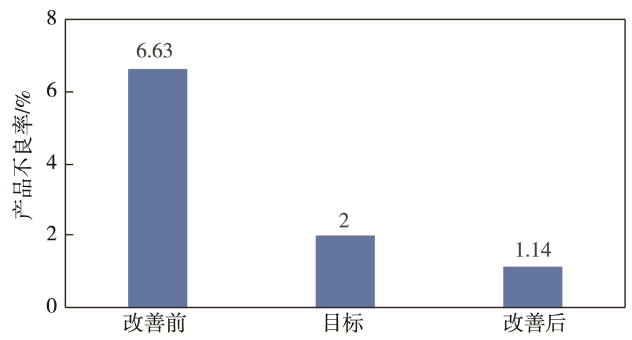


图 13 异色发白不良率对比图
Fig.13 Contrast chart for adverse rate of discoloring and whitening

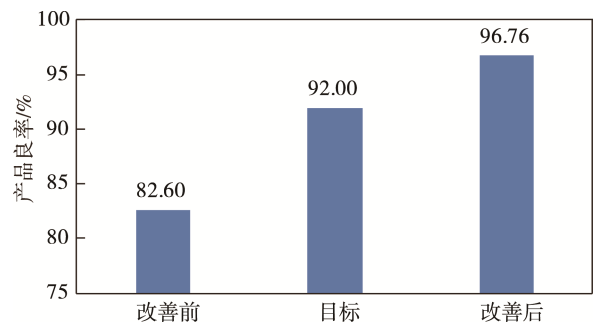


图 14 总良率对比图
Fig.14 Contrast chart of total desirable rate

表 15 改善数据统计
Tab.15 Statistics of improvement data

周别	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	汇总
总投入数	497409	490246	353569	556753	1897977
总不良数	16608	16026	12120	16866	61620
一次良率/%	96.66	96.73	96.57	96.97	96.76
异色发白不良数	6504	5039	4254	5859	21656
异色发白不良率/%	1.31	1.03	1.20	1.05	1.14
节省成本/元	247686	256967	179701	290785	975139

6 结论

针对阳极异色发白问题,采用 6σ 方法进行了改善,据改善后阳极良率和异色发白不良率数据显示,达到了预期目标,成功地将异色发白不良率降低到了 2%以下,产品阳极处理的良率从 82%提升到 96%。产品质量的提升,意味着企业生产效率的提高和生产成本的降低,从而可获取更高的利润。

参考文献:

- [1] 姜宏. 正交实验在改善手机涂装色差上的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

- JIANG Hong. An Application Study of Orthogonal Experiment on Improving Color Difference of Cell Phone in Painting Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [2] 邓银, 张胜涛, 苏新虹, 等. 前处理对化学沉镍金金面外观影响的研究[J]. 印制电路信息, 2011(11): 42-45.
- DENG Yin, ZHANG Sheng-tao, SU Xin-hong, et al. Study on Impact of Different Pre-treatments on Gold Surface Appearance in Electroless Nickel Immersion Gold Process[J]. Printed Circuit Information, 2011(11): 42-45.
- [3] 徐永, 周润根. 手机外壳涂装质量控制[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(7): 70-72.
- XU Yong, ZHOU Run-gen. Coating Quality Control of Mobile Phone Crust[J]. Electroplating and Finishing, 2012, 31(7): 70-72.
- [4] 王平, 魏晓伟. 多孔型阳极氧化膜的形成机理[J]. 表面技术, 2005, 34(6): 28-30.
- WANG Ping, WEI Xiao-wei. Research on Mechanism of Film Forming of Porosity Anodize Oxide [J]. Surface Technology, 2005, 34(6): 28-30.
- [5] KUMARAVADIVEL A, NATARAJAN U. Application of Six-sigma DMAIC Methodology to Sand-casting Process with Response Surface Methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(5-8): 1403-1420.
- [6] NITHYANANDAM G K, PEZHINKATTIL R. A Six Sigma Approach for Precision Machining in Milling[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1474-1488.
- [7] LEAPHART C L, GONWA T A, MAI M L, et al. Formal Quality Improvement Curriculum and DMAIC Method Results in Interdisciplinary Collaboration and Process Improvement in Renal Transplant Patients[J]. Journal of Surgical Research, 2012, 177(1): 7-13.
- [8] 张爱丽, 章晨峰, 邵杰. 基于 Minitab 软件优化天舒胶囊一步制粒工艺[J]. 中草药, 2013, 44(22): 3131-3135.
- ZHANG Ai-li, ZHANG Chen-feng, SHAO Jie. Optimization of One-step Pelletization Technology of Tianshu Capsule by Minitab[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2013, 44(22): 3131-3135.
- [9] 陈宏玉. 5W1H 分析法在核电工程公司合同管理中的应用[J]. 项目管理技术, 2016, 14(4): 108-112.
- CHEN Hong-yu. Application of 5W1H Analysis in Contract Management of Nuclear Power Engineering Company[J]. Project Management Technology, 2016, 14(4): 108-112.
- [10] 于雅楠. 改善旋翼飞行体气动参数的正交试验优化设计[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 668-675.
- YU Ya-nan. Orthogonal Experimental Optimization Design for Improving Aerodynamic Characteristics of Hovering Air Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 668-675.
- [11] 曹营军, 冯武斌, 毕晓蒙, 等. 基于正交试验设计的末修弹脉冲参数优化研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 136-139.
- CAO Y J, FENG W B, BI X M, et al. The Research on Pulse Parameter Optimization of Terminal Trajectory Correction Projectile Based on Orthogonal Experimental Design Method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(6): 136-139.
- [12] 禹建丽, 黄鸿琦, 陈洪根. 基于 RSM 的电铸自支撑金刚石-镍复合膜参数优化[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 83-87.
- YU Jian-li, HUANG Hong-qi, CHEN Hong-gen. RSM-based Parameter Optimization of Electrotyping Free-standing Diamond-Nickel Composite Film[J]. Surface Technology, 2017, 46(5): 83-87.
- [13] DAI Y, LUO Y Z, WANG Z J. A New Adaptive CUSUM Control Chart for Detecting the Multivariate Process Mean[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 27(7): 1-5.
- [14] 丁纯, 李君扬. 德国“工业 4.0”: 内容、动因与前景及其启示[J]. 德国研究, 2014, 112(29): 49-66.
- DING Chun, LI Jun-yang. “Industry 4.0” in Germany: Content, Motivation and Prospect and Enlightenment, 2014, 112(29): 49-66.
- [15] 许庆, 周好斌, 张涛. 油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 87-90.
- XU Qing, ZHOU Hao-bin, ZHANG Tao. Intelligent Pulse Current Cathodic Protection Power Supply Control System for Oil Well Casing[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 87-90.
- [16] WANG W, DE S, CASSAR G, et al. Knowledge Representation in the Internet of Things: Semantic Modelling and Its Applications[J]. Automatika-Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2013, 54(4): 388-400.