

文章编号:1007-2780(2016)05-0435-07

高 PPI ADS 产品白 Mura 不良产生原理及改善研究

桑胜光*,车晓盼,王嘉黎,郭红光,井杨坤,李 泽,游 伟
(合肥京东方光电科技有限公司 Cell 技术部,安徽 合肥 230012)

摘要:现有传统 TFT-LCD 生产工艺中,Rubbing 工艺在生产高 PPI ADS 产品的过程中,在改善 Rubbing Mura 不良时会使用 H Cloth,但使用 H Cloth Glass 在经过 Rubbing 后 ODF Rubbing Cleaner 清洗时会出现白 Mura 不良。经过对白 Mura 不良 Panel 的微观解析,并结合 H Cloth 性质分析出白 Mura 不良是由于 H Cloth 自身的聚醋酸脂颗粒经过 Rubbing Cleaner 聚集造成的。从 Rubbing Cleaner 清洗时改变 Glass 表面性质(醇类可以有效改变界面性质)入手,通过使用 IPA 对 Glass 进行清洗以改变聚醋酸脂疏水性,使得聚醋酸脂颗粒更易被 Rubbing Cleaner 清洗掉来改善白 Mura 不良,并结合生产实际定期对 IPA 进行更换以保持 IPA 浓度处于一个稳定的区间,使得高 PPI ADS 产品白 Mura 不良发生率由改善前的 3.42%降低至改善后的 0.11%,白 Mura 不良得到非常有效的改善。

关 键 词:高 PPI;白 Mura 不良;聚醋酸脂;疏水性

中图分类号:TP394.1; TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163105.0435

Principle and improving research of white mura defect in high PPI ADS product

SANG Sheng-guang*, CHE Xiao-pan, WANG Jia-li, GUO Hong-guang,
JING Yang-kun, LI Ze, YOU Wei

(HeFei BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Hefei 230012, China)

Abstract: In the traditional Process of TFT-LCD, H Cloth is always used to improve Rubbing Mura in the production of High PPI ADS Products, but when H Cloth is used, the White Mura Defect will appear after Rubbing Cleaner. By analyzing of White Mura Defect micro appearance and the nature of H Cloth, the White Mura Defect is caused by the gathering effect of Acetate Polymer after Rubbing Cleaner. In this paper, we change Acetate from Hydrophobic to Hydrophilic by changing the surface property of glass in the Rubbing Cleaner (alcohol can effectively change the interface property) and the Acetate Polymer particle is easily to be cleaned. In actual production, we replace IPA at regular period to keep the IPA concentration in stable range. As a result, the White Mura is effectively improved and controlled and the defect ratio is greatly decreased from 3.42% to 0.11%.

Key words: High PPI; white Mura defect; acetate polymer; hydrophobic

收稿日期:2015-12-23;修订日期:2016-01-15.

* 通信联系人, E-mail: sangshengguang@boe.com.cn

1 引言

近年来液晶显示器以其低工作电压、低功耗、低辐射、低空间占有率以及轻薄美观等优势,不断普及,已成为市场的主流。随着液晶产品拥有量的增大和使用的深入,人们对液晶产品的特性也提出了更高的要求,高像素密度(PPI)产品越来越受到人们的追捧^[1-2]。

随着 PPI 要求越来越高,随之而来的问题是在传统 Rubbing 工艺生产中^[3],随着像素密度的增加,PI(聚酰亚胺)配向膜在与 Rubbing Cloth(摩擦布)进行摩擦接触时,Rubbing Cloth 本身无法做到绝对的均一性,且由于玻璃基板表面有各层段差的存在无法做到绝对平坦,加剧了对应不良 Rubbing Mura 严重的可能。经过综合考虑,采取更换 Rubbing Cloth 来尽可能地降低 Rubbing Mura 的发生,通过 Rubbing Cloth 对比,H Cloth 和 R Cloth 由于其高 CR(对比度)、较低的 Rubbing Mura Level 水准而得到了较好的应用。

但是在 Rubbing 工艺使用 H Cloth 时,TFT 侧玻璃在经过 ODF Rubbing Cleaner(摩擦后清洗机)清洗后,会出现白 Mura 不良。而从国内外了解的资讯,行业内对此不良均未找到有效的解决方法。

本文就是在上述背景基础上,从分析 Rubbing Cloth 自身特性及 Rubbing Cloth 与 Glass 表面作用后表面特性入手,通过大量实验设计并结合生产实际,采集多组数据,研究了白 Mura 不良发生的机理并找到了白 Mura 不良改善的管控方法。

2 Rubbing 工艺及 Rubbing Cloth 介绍

2.1 Rubbing 工艺介绍

Rubbing 工艺^[4]是利用尼龙、纤维或棉绒等材料(Rubbing Cloth,摩擦布)按一定方向对取向膜表面进行摩擦处理,使取向膜对液晶分子产生均一的锚定能力,从而使液晶分子能够按一定的预倾角进行稳定、均一的排列。取向效果的好坏对于液晶显示器的均一性、视角、色差、响应速度、

阈值电压等基本特性有重要影响。由于现有的传统 Rubbing 工艺采用接触式摩擦,Rubbing Cloth 在一定 Rubbing 强度下与 Glass 进行接触摩擦时,Rubbing Cloth 会有颗粒产生。

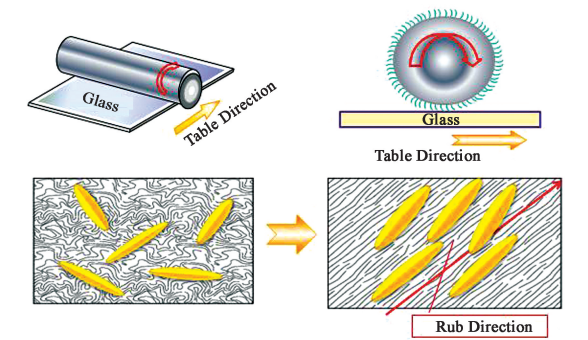


图 1 Rubbing 工艺原理
Fig.1 Principle of Rubbing process

2.2 Rubbing Cloth 介绍

Rubbing Cloth 主要由基布和 Pile(绒毛)组成,其绒毛主要分为棉布、尼龙和人造丝等。Rubbing Cloth 绒毛的材质状况在一定程度上决定了产品性能的高低。从实际生产来看,同为人造丝摩擦布,R Cloth 相比较于 H Cloth,Rubbing Mura 水准稍微差一些,但使用 H Cloth 的产品在经过 ODF Rubbing Cleaner 清洗后会产生白 Mura 不良。下面主要介绍本文中会使用到的两款 Rubbing Cloth(H Cloth 和 R Cloth)的主要参数(如图 2 所示)。

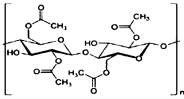
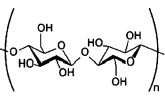
	H cloth	R Cloth
纤维种类	半合成纤维 醋酸脂纤维	半台成纤维
纤维构造式		
强度	0.97	1.8
杨氏模量	350~550	850~1 150
特点	不吸湿 强度小不耐摩擦	吸湿放湿大 强度大耐摩擦

图 2 Rubbing Cloth 参数对比

Fig.2 Contrast of Rubbing Cloth parameter

从纤维构造式看,H Cloth 和 R Cloth 绒毛均是由聚醋酸脂组成,但由于两种 Cloth 的纤维构造

不同,导致 H Cloth 纤维强度(0.97)约为 R Cloth 纤维强度(1.8)的一半。为了保持 H Cloth 自身较好的 Rubbing Mura 水准和尽量降低白 Mura 不良的发生率,H Cloth 需要经过碱液处理,图 3 为碱液处理化学反应式。

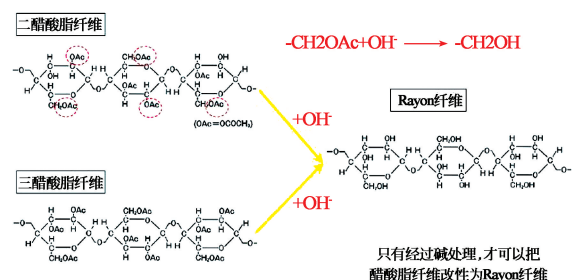


图 3 H Cloth 碱液处理

Fig. 3 Alkali process of H Cloth

经过碱液处理后, H Cloth 外壳成分较接近 R Cloth。但是, 在碱液处理前 H Cloth 的醋酸酯纤维强度约为 R Cloth 纤维强度的一半, 经碱液处理后, H Cloth 纤维变得更松更脆, 其纤维强度更小。

3 白 Mura 不良原理分析

在使用传统 Rubbing 工艺并使用 H Cloth 进行生产过程中,由于 H Cloth 自身的纤维强度较小,摩擦布在与 Glass 进行摩擦时会有大量的 Cloth 颗粒出现,经过 Rubbing Cleaner 清洗时,Rubbing Cloth 颗粒移动,在 Glass Dummy 区域聚集而出现白 Mura 不良。伴随着 Rubbing 强度的增加,Rubbing Cloth 与 Glass 之间的摩擦力随之加大,白 Mura 不良的发生呈现严重的趋势。图 4 为实际生产过程中,Rubbing 强度与白 Mura 不良发生率之间的关系。

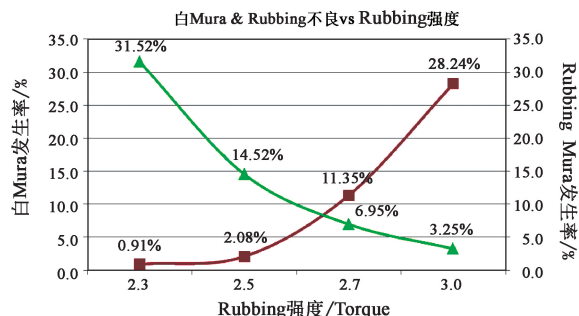


图 4 Rubbing 强度 vs 白 Mura 发生率对比图

Fig. 4 Rubbing strength vs the ratio of white Mura

由于 H Cloth 是在改善 Rubbing 不良过程中导入实际生产的,在改善 Rubbing Mura 的同时,又造成了白 Mura 不良的高发,因此在改善白 Mura 不良的初期阶段,同样进行了 Rubbing Cloth 的变更测试(H Cloth 变更为 R Cloth)。

Rubbing Cloth 在由 H Cloth 变更为 R Cloth 后,虽然白 Mura 不良得到了有效的改善,但 Rubbing 固有不良 Rubbing Mura 却又出现了高发(如图 5),白 Mura 不良发生率由 37.98%降低至 0.29%,但是 Rubbing 相关不良却由 6.1%上升至 12.57%。白 Mura 不良仍未得到有效的解决。

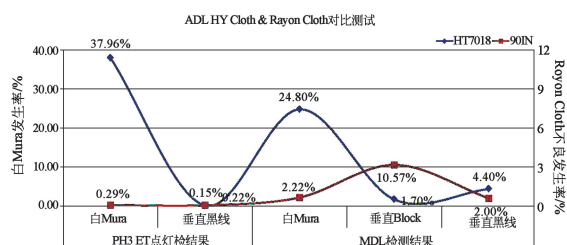


图 5 H Cloth 和 R Cloth 不良率对比

Fig. 5 Defect contrast of H Cloth and R Cloth

3.1 自 Mura 不良现象及解析

从改善白 Mura 不良的前期测试结果来看,白 Mura 不良与 Rubbing Mura 不良像处于一台天平的两端,在解决一种不良的同时会造成另一种不良的高发。因此需要找到一个解决此两种不良的平衡点。为了有效解决白 Mura 不良的发生,对发生白 Mura 不良的产品进行履历调查及微观解析。



图 6 白 Mura 不良 Panel

Fig. 6 Defect panel with white Mura defect

白 Mura 不良在 Panel 区域的发生位置不固定,对发生白 Mura 不良的 Panel 进行履历调查时发现(以 4.5ADS SEC 向(三星向)产品为例进

行说明,如图 7),白 Mura 不良主要集中在 Glass 的 Q-Dummy 交界区域。

同时,对白 Mura 不良产品进行微观解析分析:

(1)FIB 结果显示 PI 膜层厚度未出现差异(如图 8,FIB 结果),白 Mura 不良区域相较于 OK 区域在 Vcom 过孔四周可见明显颗粒(如图 9, FIB 结果);

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R
A	0.0%	26.3%	21.1%	15.8%	30.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%
B	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%
C	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
D	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%
E	5.3%	5.3%	15.8%	21.1%	30.0%	35.0%	35.0%	25.0%	22.7%	27.3%	22.7%	27.3%	20.0%	20.0%	20.0%	25.0%
F	5.3%	5.3%	15.8%	21.1%	35.0%	30.0%	30.0%	30.0%	27.3%	27.3%	27.3%	27.3%	25.0%	25.0%	25.0%	20.0%
G	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
H	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.5%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%
J	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
K	5.3%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
L	0.0%	0.0%	21.1%	21.1%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.5%	4.5%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	15.0%
M	0.0%	5.3%	26.3%	15.8%	0.0%	9.1%	18.2%	13.6%	14.3%	14.3%	23.8%	23.8%	5.3%	10.5%	10.5%	10.5%
N	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
P	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Q	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
R	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	13.6%	13.6%	13.6%	18.2%	19.5%	14.3%	14.3%	19.0%	10.5%	10.5%	10.5%	10.5%
S	21.1%	21.1%	26.3%	15.8%	18.2%	18.2%	18.2%	18.2%	19.0%	14.3%	14.3%	19.5%	5.3%	10.5%	10.5%	10.5%
T	0.0%	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
U	0.0%	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
V	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
W	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
X	0.0%	5.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

图 7 白 Mura 不良 Mapping
Fig.7 Mapping of white Mura



图 8 白 Mura 不良 FIB 结果-1
Fig.8 Result of white Mura by FIB-1

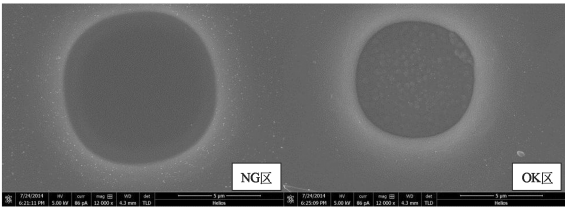


图 9 白 Mura 不良 FIB 结果-2
Fig.9 Result of white Mura by FIB-2

(2)AFM 下观察,白 Mura 不良区域表面粗糙度异常(如图 10,AFM 结果)。

从 FIB 和 AFM 结果来看,白 Mura 不良发

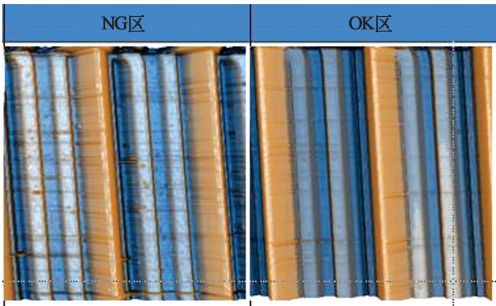


图 10 白 Mura 不良 AFM 结果
Fig.10 Result of white Mura by AFM

生的区域,其在 Glass 基板表面上对应位置存在顽固颗粒,并且这些顽固颗粒未能被 Rubbing Cleaner 有效清洗掉,反而使顽固颗粒出现了聚集。

3.2 白 Mura 不良起因分析

传统 Rubbing 工艺采用接触式摩擦方式, Rubbing Cloth 势必会与 Glass 基板进行摩擦接触,而现有 Rubbing 工艺使用的 H Cloth,其采用的聚醋酸酯纤维由于自身硬度较小,在摩擦过程中极易出现顽固颗粒的产生。为验证 Rubbing Cloth 寿命对白 Mura 不良的影响,在 4.5ADS SEC 投入过程中,进行了 Rubbing Cloth 寿命与白 Mura 发生的验证测试。验证结果显示(如图 11 所示):随着 Rubbing Cloth 寿命的延长,白 Mura 不良发生呈现出下降的趋势。白 Mura 不良与 Rubbing Cloth 聚醋酸酯本身性质具有强相关性。

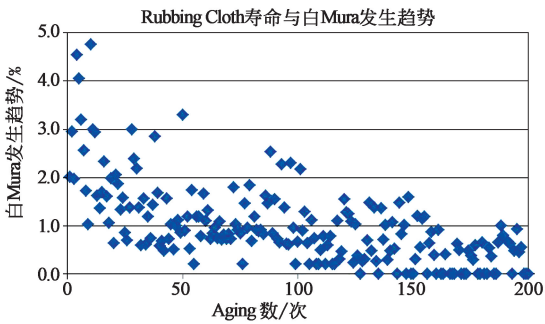


图 11 Cloth 寿命与白 Mura 发生趋势
Fig.11 Trend of white Mura vs Cloth life

在使用 H Cloth 时,Rubbing 工艺生产过程中产生的顽固颗粒,其主要成分为聚醋酸酯,在经过 Rubbing Cleaner 清洗时,由于聚醋酸酯颗粒本身具有疏水性质,Glass 基板在经过 Rubbing

Cleaner 清洗时,聚醋酸脂颗粒在 Di-Water(去离子水)中会出现相互吸引,而形成疏水聚团,疏水聚团表面极性较弱,固体表面对水分子的吸引作用较小,在 Glass 表面不易被 Rubbing Cleaner 所喷射出的 Di-Water(去离子水)带走而残留在 Glass 的表面,从而产生白 Mura 不良。

4 白 Mura 改善对策

由于白 Mura 不良是在传统 Rubbing 工艺下,H Cloth 经过 Rubbing Cleaner 清洗后产生的,因此需要从 Di-Water 与 Glass 表面的相互作用进行考虑,而相互作用就要牵涉到表面张力与 Rubbing Cleaner 清洗能力之间的关系。

表面张力指的是界面张力,是在两相的界面上发生的行为。表面张力的大小,可用表面张力系数来描述。表面张力系数的影响因素主要有温度和界面两相物质的性质^[5-6]。而白 Mura 不良主要是由 Rubbing Cloth 聚醋酸脂颗粒聚集形成的,充分考虑聚醋酸脂自身性质,从改变界面两相物质的性质着手^[7],通过改变聚醋酸脂的疏水性来改善白 Mura 不良的发生。

醇类有机物有较好的脱脂清洗效果^[8-11],通过脱脂改变界面的物质性质(疏水性变亲水性),且醇类能以任何比例与水相溶,因而在清洗液中添加醇类有机物(R-OH)可以有效提高清洗液的脱脂清洗能力,R-OH 的脱脂特性可以有效改变聚醋酸脂的特性,从而使聚醋酸脂颗粒更容易被 Rubbing Cleaner 清洗掉。

在白 Mura 改善过程中,考虑在 TFT-LCD 行业中经常使用的醇类为 IPA(异丙醇)和酒精,由于 IPA 相较于酒精具有更好的脱脂能力,更高的溶解度及更低的挥发性,因此考虑 IPA 在 Rubbing Cleaner 内使用对 Glass 进行清洗^[7]并进行测试。

大多数非离子型的有机物如醇类(IPA,酒精等)、醛类的水溶液作为表面活性剂时,其随着浓度增加时,溶液的表面张力减小。但浓度在到达一定程度后,其表面张力变化很小或不变,此时,清洗液的表面张力最小,对应的混合 IPA 的 Rubbing Cleaner 清洗液的清洗能力最强。使用 IPA 前后白 Mura 不良发生率趋势如

图 12 所示。

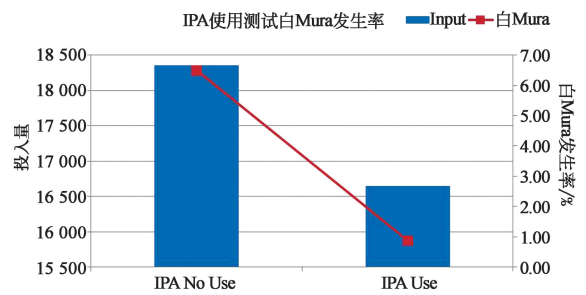


图 12 IPA 使用与白 Mura 发生率
Fig. 12 Trend of white Mura of IPA use

实际生产过程中,对应 IPA 使用单元,为节约成本,采用内循环方式进行生产,随着时间的延长,IPA 单元的清洗液中所包含的杂质成分会越来越多。对于洁净度要求特别高的 TFT-LCD 行业中,当 Rubbing Cleaner 清洗液中的杂质浓度超过一定比例时,势必会造成产品良率的下降,图 13 为 IPA 使用的初始浓度为 100% 时,白 Mura 发生率与 Particle 不良发生率对比图。

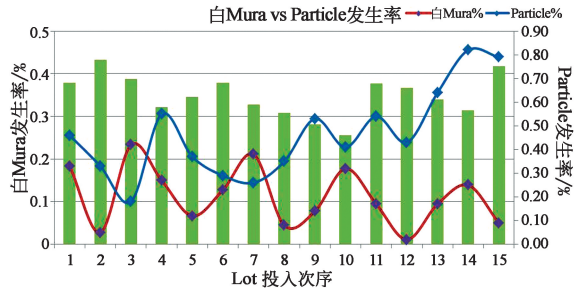


图 13 IPA 使用时间与白 Mura 不良发生率
Fig. 13 Ratio of white Mura vs IPA use time

从图 13 可以看出,IPA 的初始浓度为 100% 时,白 Mura 不良得到了有效的控制,但随着 IPA 使用时间的延长,异物不良发生率在使用到一定时间的时候会出现一个逐渐升高的趋势。

IPA 存在挥发性,随着 IPA 使用时间的延长,IPA 的浓度会降低,造成 Rubbing Cleaner 内的清洗液的脱脂能力逐渐降低,表面张力逐渐变大,聚醋酸脂的疏水特性更不易改变。结合实际生产过程中的良率数据分析,白 Mura 的发生率随着 IPA 使用时间的延长呈现逐渐上升的趋势。从生产的角度来说,使用初始浓度为 100% 的 IPA 清洗液对生产来说是一种成本浪费,因此,需要寻找影响白 Mura 发生的 IPA 浓度下限并制定

合理的 IPA 浓度的管控区间。

从生产成本的角度考虑,经过综合考虑,使用初始浓度为 30% 的 IPA 清洗液对 Glass 进行清洗,并收集对应良率进行参考,同时,在每 Lot 投入前测量 IPA 的浓度,所得的数据如图 14 所示(左侧纵坐标为 IPA 浓度,右侧纵坐标为白 Mura 发生率)。

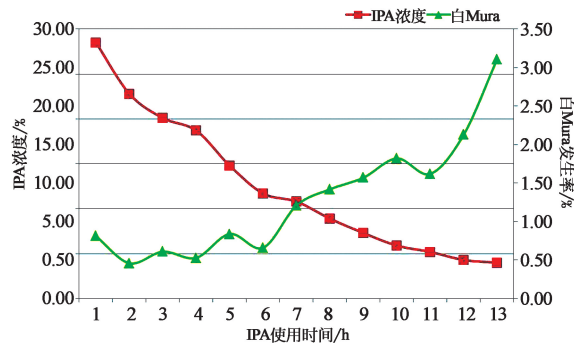


图 14 IPA 浓度与白 Mura 发生率

Fig. 14 Ratio of white Mura vs IPA concentration

从图 14 看出,随着 IPA 使用时间的延长,IPA 浓度逐渐降低,当 IPA 浓度降低到一定程度后,其对白 Mura 不良的抑制作用就减弱,于是,在实际生产中,执行定期对 IPA 进行更换的原则对应生产,以保持 IPA 浓度始终处于一个较稳定的区间。

IPA 对应生产原则导入实际生产后,其白 Mura 不良的发生率处于一个很低的水平,利用 6Sigma 中 P 控制图对 4.5ADS SEC 向测试品改善前后的白 Mura 不良发生率进行分析(如图 15 所示)。

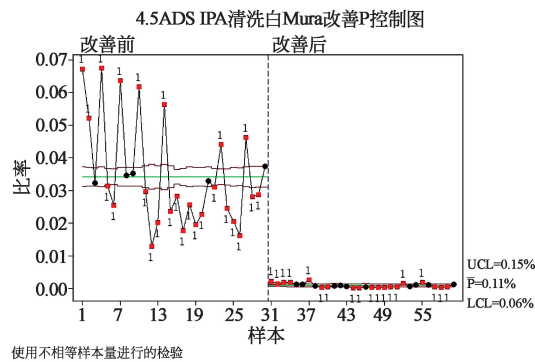


图 15 改善前后白 Mura 发生率

Fig. 15 Contrast of white Mura at different improve period

白 Mura 不良在改善后处于稳定的较低的发生率(3.42%→0.11%)。同时,在实际生产中,将该改善措施应用于正在生产的几款 HD & FHD 产品中,白 Mura 不良的发生率同样取得了非常有效的效果(如图 16 所示,几款 SEC 向量产品的白 Mura 不良发生率对比)。

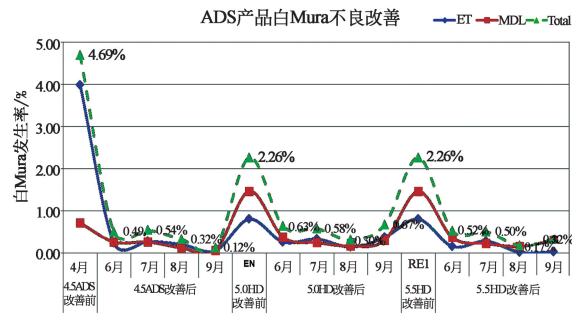


图 16 改善前后 SEC 向量产品白 Mura 发生率

Fig. 16 Contrast chart of white Mura by SEC products

5 结 论

本文通过微观解析现有高 PPI 产品的白 Mura 不良 Panel,并结合使用的 H Cloth 的成分分析(聚醋酸酯)入手,推测出白 Mura 不良是由于 Glass 基板经过 Rubbing Cleaner 清洗时,聚醋酸酯颗粒在 Di-Water 中聚集形成疏水聚团,聚醋酸酯颗粒在 Glass 表面不易被 Rubbing Cleaner 所喷射出的 Di-Water 带走而残留在 Glass 的表面产生的。

从流体力学理论中的表面张力论出发,通过改变 Glass 表面的界面性质来提升 Rubbing Cleaner 自身的清洗能力,并将醇类(IPA)导入至实际生产中,通过 IPA 将 Glass 表面的 Rubbing Cloth 的聚醋酸酯颗粒由疏水性变为亲水性,使聚醋酸酯颗粒更易被 Rubbing Cleaner 清洗掉来改善白 Mura 不良。通过实际生产验证,白 Mura 不良发生率由改善前的 3.42%降低至 0.11%,白 Mura 不良的改善取得预期的效果。同时,对比几款 SEC 向产品,白 Mura 不良改善前后的发生率,在 IPA 相关管控措施导入至实际生产后,白 Mura 不良发生率均处于较低的发生水准。

参 考 文 献:

- [1] 车春城. 广视角 FFS 技术 CELL 研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2007.
CHE C C. *The Research and design of the technique of FFS CELL with wide angle of view* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [2] 郑先锋,祝迎花,金婷婷,等. 高 PPI 产品下的取向膜画面品质改善研究[J]. 液晶与显示,2015,30(4):608-615.
ZHENG X F, ZHU Y H, JIN T T, *et al.* Research on improving picture quality of alignment film [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 608-615. (in Chinese)
- [3] 石天雷,杨国波,程石,等. Zara 漏光和 Rubbing Mura 改善研究[J]. 液晶与显示,2012,27(2):208-211.
SHI T L, YANG G B, CHENG S, *et al.* Zara and Rubbing Mura research [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 208-211. (in Chinese)
- [4] 高鸿锦,董友梅. 液晶与平板显示技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2007:254-259.
GAO H J, DONG Y M. *Liquid Crystals and Flat Panel Display Technology* [M]. Beijing: *Beijing University of Posts and Telecommunications Press*, 2007: 254-259. (in Chinese)
- [5] 刁岗,李伟昌. 现代农业和生物学中的物理学[M]. 北京:科学出版社,2002
XI G, LI W C. *The Physics of Modern Agriculture and Biology* [M]. Beijing: *Beijing University Press*, 2002. (in Chinese) (请核对英文标题信息)
- [6] 梁智权. 流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
LIANG Z Q. *Hydromechanics* [M]. Chongqing: *Chongqing University Press*, 2002. (in Chinese)
- [7] 任文辉,林智群,彭道林. 液体表面张力系数与温度和浓度的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(1):77-79.
REN W H, LIN Z Q, PENG D L. On the relationship between the liquid surface tension and the temperature and the concentration [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2004, 30(1): 77-79. (in Chinese)
- [8] 熊金平,俞宏英,孙冬柏,等. 醇、酸类添加剂对脱脂清洗液清洗效果的影响[J]. 化学清洗,1995,11(3):1-4.
XIONG J P, YU H Y, SUN D B, *et al.* Affection of alcohol and acid additives on rinsing effect of grease-removing agent [J]. *Chemical Cleaning*, 1995, 11(3): 1-4. (in Chinese)
- [9] 田怡,高华,张闻斌,等. 表面活性剂在单晶硅太阳能电池片制绒中的作用[J]. 电子工艺技术,2012,33(4):234-237.
TIAN Y, GAO H, ZHANG W B, *et al.* Effect of surfactant on texture of monocrystalline silicon solar cell [J]. *Electronics Process Technology*, 2012, 33(4): 234-237. (in Chinese)
- [10] 张静,李蓓,肖筱瑜. 疏水性有机高分子材料表面亲水性改善研究及应用现状[J]. 矿产与地质,2003,17(1):87-89.
ZHANG J, LI H, XIAO X Y. Study on surface modification of hydrophobic organic polymer material to improve its hydrophilicity and application [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(1): 87-89. (in Chinese)
- [11] 李本刚,陈正国. 表面活性剂溶液动态表面张力及吸附动力学研究[J]. 化学进展,2005,17(2):233-241.
LI B G, CHEN Z G. Advance on the study of dynamic surface tension and adsorption kinetics of surfactant solution [J]. *Progress in Chemistry*, 2005, 17(2): 233-241. (in Chinese)

作者简介:桑胜光(1982—),男,山东菏泽人,硕士,高级工程师,主要从事 TFT-LCD 制程工艺的研究。E-mail:sangsh-engguang@boe.com.cn