

文章编号:1007-2780(2025)10-1450-08

TFT 基板创新遮光维修及参数优化分析

谈思云, 何 彬, 胡延雨, 蒋腾腾, 张小松, 李登涛, 刘浩然^{*}
(合肥京东方显示技术有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘要:针对 TFT 基板上发生率约为 0.23% 的某些特定亮点型不良无法维修的情况, 提出一种使用 UV 固化型黑色遮光材料对亮点像素进行遮盖涂覆的方法。该方法可用于维修所有的亮点型不良, 充分提升了基板暗点化维修的能力。首先通过点灯检测、显微镜观察、聚焦离子束分析等系列实验, 验证了遮光材料涂覆亮点像素暗点化维修的可行性; 然后利用对比实验探究得到实现暗点化的重要控制参数为遮光率和涂覆高度, 分别探究了红外强度、红外作用时间以及吐出压力 3 个因素对二者的影响; 最后引入响应面分析法, 构建了遮光率和涂覆高度对应的响应预测模型并与实验数据进行对比验证, 解析得到最优工艺参数为红外强度 87.9%、红外作用时间 2 488 ms、吐出压力 0.015 8 MPa。根据实验结果投入量产测试, TFT 基板上不同诱因的亮点型不良维修成功率达 98%。

关键词: TFT 基板; 暗点化维修; 物理遮光; 红外加热; 响应面法

中图分类号: TN141.9; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0147 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0147

Innovative shading maintenance and parameter optimization analysis of TFT substrate

TAN Siyun, HE Bin, HU Yanyu, JIANG Tengting, ZHANG Xiaosong, LI Dengtao, LIU Haoran^{*}

(Hefei BOE Display Technology Co. Ltd., Hefei 230012, China)

Abstract: In order to solve the issue of certain specific bright spot defects on TFT substrates, which occur at a rate of approximately 0.23% and cannot be repaired, a method of coating bright spot pixels with UV curable black shading material is proposed. This method can be used to repair all bright spot defects, and the ability to repair the substrate by darkening the pixels is fully enhanced. Firstly, a series of experiments including lighting detection, microscopic observation, and focused ion beam (FIB) analysis were conducted to verify the feasibility of light shielding material coating bright spot pixels to achieve pixel darkening. Then, through experimental exploration, it was found that the important control parameters for achieving pixel dimming are shading rate and coating height. The effects of three factors, infrared intensity, infrared exposure time and discharge pressure, on shading rate and coating height were investigated. Finally, the response surface method was introduced to construct a response prediction model corresponding to shading rate and coating height, which was validated with experimental data. The optimal process parameters of three factors were analyzed to be 87.9%, 2 488 ms, and 0.015 8 MPa. According to the experimental results, the success rate of repairing bright spot defects on TFT substrates caused by different factors is 98% in the mass production.

收稿日期: 2025-07-15; 修订日期: 2025-08-14.

*通信联系人, E-mail: liuhaoran@boe.com.cn

Key words: TFT substrate; darkening point maintenance; physical shading; infrared heating; response surface method

1 引言

随着液晶显示行业的发展及制造工艺的不断完善,人们对显示屏的追求也不断上升,这也带动了出货标准的不断提高,间接地对制造及维修工艺要求也不断加强。目前整个显示屏的制造流程分为阵列基板(Array)、彩膜基板(CF)、成盒工序(Cell)以及整机组装(Module)4大工序。而阵列基板作为工艺最复杂的工序,在生产过程中由于人、机、料、法、环的变化容易使 TFT 基板产生缺陷,如点与线的不良。在所有缺陷中,亮点型不良一直处于高发生率^[1]。在 TFT-LCD 的诸多工艺制程中,造成亮点不良的原因有很多,大致可以分为 3 类:短路、断路、寄存电容等^[2]。

响应面优化法^[3](Response Surface Method, RSM)是一种基于多元回归的数学统计方法,通过寻找各个因子的最优响应水平建立响应面模型。响应面方法可以灵活处理多因素之间的交互作用,经过多次试验进行多元二次回归拟合。相比于传统的正交试验设计方法,其在因子水平及响应范围上更具连续性,更有助于寻找最优解。

目前常用的亮点修复方式有激光焊接(Welding)方法^[4]、黑矩阵扩散法^[5-6]、ITO 黑化法^[7]。其中激光焊接方法针对某些特定的不良,如源漏极上的金属未被刻蚀导致的大面积金属扩散形成的亮点,因 TFT 基板上像素氧化铟锡薄膜(ITO)缺失形成的亮点等无法实现暗点化,导致不能维修的不良占比约为 0.23%。此外,该方法还需要在产品设计中提供暗点化空间。针对彩膜基板亮点维修的黑矩阵扩散法,随着产品对高透的追求,产品设计中可用于打散的黑矩阵越来越少,暗点化能力明显下降。ITO 黑化法是在成盒工艺后,于玻璃侧对 TFT 基板的像素区对有机物进行激光熔融形成黑化暗点,但其对于在 TFT 基板像素区域维修过的情况无法在不破坏原结构的情况下二次维修,显现出一定的局限性。

考虑到当前液晶显示面板行业暂无利用遮光液修复 TFT 基板亮点像素的量产实绩,同时没有公开的系统性研究论文和报道,本文提出一种

新型暗点化维修方法。为保证亮点像素覆盖率以及固化后的高度满足后续工艺要求,使用 RSM 方法建立像素覆盖率模型和固化材料高度模型,在综合各因素交互作用的前提下,研究红外强度、红外作用时间以及针头压力对所建立的响应模型的影响,以得到最优的参数配比。由于本方法在不涉及电路改变的情况下实现暗点化,既拓宽了暗点化维修范围,又解决了因传统维修方式限制导致的产品设计受限问题^[8],为产品设计提供了新思路。

2 修复设备与方法介绍

2.1 修复设备

本次实验采用液态材料涂覆(Inkjet)设备对亮点进行遮盖修复,如图 1 所示,该设备主要搭载了研磨单元、涂覆单元、激光单元及测高单元。设备涂覆单元的针头直径为 10~25 μm ,可实现精细控制。测高单元采用线性接触式测高,接触面积大,能清晰反映整个像素区域内的最高位置。同时设备配备有纳秒激光器,利用其烧蚀机理^[9-10]可对固化后超高的位置进行激光减薄。

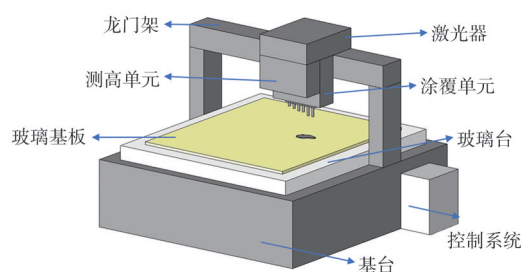


图1 修复装置简图

Fig. 1 Repairing device diagram

2.2 修复方法原理

本方法引入一种 UV 固化型^[11]黑色遮光材料,以气压控制毛细管针头吐出到亮点像素表面。由于遮光液吐出后流动性差,无法精准控制涂覆高度和遮光率,需要多次涂覆,完成单点位涂覆耗费时间久。因此,引入 110 W 红外加热灯,通过红外辐射^[12]的方式加热遮光材料,降低液体表面

张力,增强流动性,使其均匀覆盖在整个像素范围内。经验证,单点修复时间从 6 min 降为 60 s。

涂覆后先在固定背光情况下检测其透过率,再使用 UV 灯进行固化处理,然后进行像素区域内的高度检测。若测得高度不符合对盒要求,可使用纳秒激光器重加工处理以保证维修效果的稳定性。图 2 为修复后效果图。

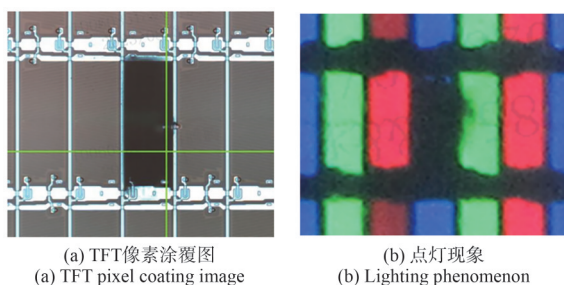


图 2 像素显示区域图

Fig. 2 Pixel display area map

2.3 修复效果检测

以某款 75 in (1 in=2.54 cm) ADS 显示模式实验样品的液晶显示屏为例,在暗点化维修完成后,使用设备检测单元对像素进行初步检测:(1)像素遮光率 $>85\%$;(2)设备对像素的接触式测高结果 $(1.9\pm 0.2)\mu\text{m}$ 。其次,TFT 基板与彩膜基板对盒后使用点灯器件二次检测,暗点化区域灰度值达到标准,未形成低亮点、光晕^[13]等不良。

2.4 常见的修复失败模式

本方法实验过程中常见的失败模式主要有 2 种,如图 3 和图 4 所示。第 1 种为涂覆后亮点像素的遮盖率小于 80% ,第 2 种是 TFT 基板与彩膜基板对盒后由于涂覆高度过高产生的光晕不良。

第 1 种失败模式主要由于像素涂覆不完整,空隙率过高,导致点灯时透光率高,暗点化失败。

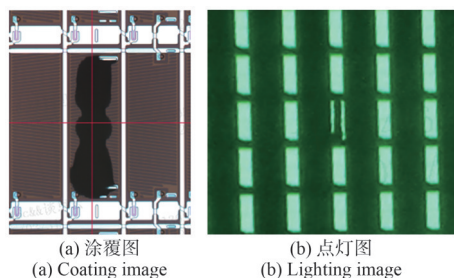


图 3 第一种修复失败模式图

Fig. 3 First mode of repairing failure

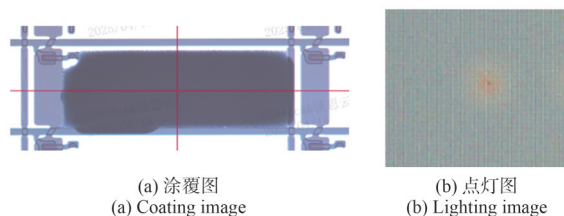


图 4 第二种修复失败模式图

Fig. 4 Second mode of repairing failure

第 2 种失败模式主要由于在 TFT 基板上进行涂覆,未考虑后续成盒工艺关于对盒高度的把控,涂覆时高度超过界限,高背光情况下完全不透光,使点灯时出现光晕不良的现象。

3 修复影响因素

3.1 设备影响因子

本方法通过气压控制微米级的针头吐出遮光材料,由于遮光材料在红外光的作用下会发生溶剂蒸发的现象^[14],且针头气压的大小也会对材料的吐出量造成影响,因此本文选取 3 个实验因素:红外强度、红外作用时间、吐出压力,研究其对遮光率以及像素涂覆高度的影响。

3.2 单因素实验

讨论红外强度、红外作用时间、吐出压力 3 个因素对像素遮光率以及涂覆高度的影响,根据可行性实验得出实验参数范围见表 1。

表 1 单因素实验表

Tab. 1 Single factor experiment table

序号	红外强度 $X_1/\%$	红外作用时间 X_2/ms	吐出压力 X_3/MPa
1	80	2 000	0.010
2	85	2 200	0.012
3	90	2 400	0.014
4	95	2 600	0.016
5	100	2 800	0.018

3.3 响应面实验设计

Box-Behnken 设计(Box-Behnken Design, BBD)是一种常用的响应面设计方法,可用于检测非线性效应,同时具有效率高和设计简单的优点^[15]。本研究通过 Design-Expert 软件,基于 BBD 方法设计了 3 因素 3 水平共 17 组响应面实验,其中包含 5 组中心组实验,实验因素及水平见表 2。

表 2 因素水平表

Tab. 2 Factor level table

水平	因素		
	红外强度	红外时间	吐出压力
	$X_1/\%$	X_2/ms	X_3/MPa
-1	70	1 500	0.010
0	85	2 000	0.013
1	100	2 500	0.016

4 实验结果分析

4.1 单因素实验结果

由图 5 可知,当红外强度从 80% 上升到 100% 时,像素高度呈现先减小后增加的趋势。在红外强度为 90% 时,像素涂覆高度低至 $1.744\text{ }\mu\text{m}$,这是由于当红外强度较小时,未达到加强遮光材料流动性的临界值,无法有效改变遮光材料的流动性。当红外强度持续升高时,像素高度显著增加,这是由于红外强度大于 90% 后,会使遮光材料溶剂部分蒸发,使得 UV 固化效率降低,无法固化完全,最终出现褶皱起皮的现象。像素遮光率总体呈现先增加后减小的趋势。当红外强度从 80% 上升到 90% 时,像素遮光率达到 91%,红外强度持续上升,遮光材料溶质凝结成团,遮光率下降。

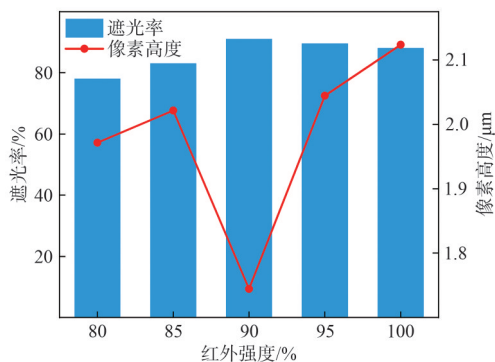


图 5 红外强度对像素高度和遮光率的影响

Fig. 5 Effect of infrared intensity on pixel height and shading rate

由图 6 可知,在红外作用时间为 2 000~2 200 ms 时,遮光率显著增加,2 200 ms 后没有明显变化。在红外作用时间为 2 000~2 200 ms 时像素涂覆高度明显下降,最低达到 $1.765\text{ }\mu\text{m}$,在 2 200 ms 后呈现明显上升趋势。这是由于长时间的红外照射使像素中心位置光强度较集中,加

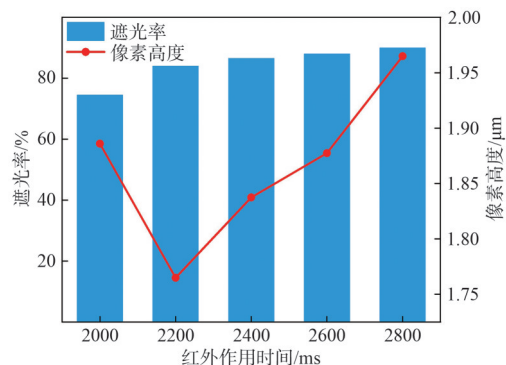


图 6 红外作用时间对像素高度和遮光率的影响

Fig. 6 Effect of infrared exposure time on pixel height and shading rate

热后使中间膜层减薄,四周膜层厚度增厚,进而使涂覆高度上升。

由图 7 可知,随着吐出压力的增大,遮光率和像素高度均呈增长趋势。当吐出压力从 0.01 MPa 增加到 0.016 MPa 时,像素高度显著增加。这是由于随着针头吐出压力的增加,相同时间内遮光材料的吐出量也随之增加。像素遮光率在吐出压力为 0.01~0.014 MPa 范围内显著增长。由于针头直径固定且遮光材料本身具有一定的黏度,因此当压力持续增加至超过 0.016 MPa 后,遮光率和像素高度均无明显变化。

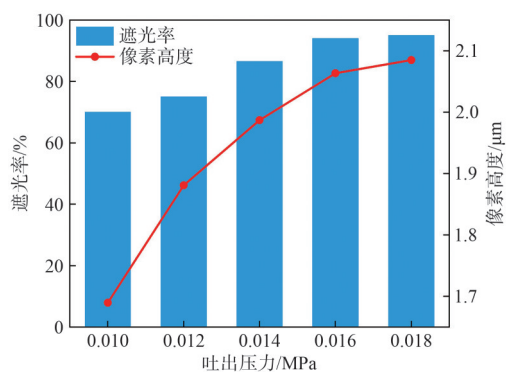


图 7 吐出压力对像素高度和遮光率的影响

Fig. 7 Effect of venting pressure on pixel height and shading rate

4.2 响应面实验

4.2.1 实验结果

讨论 3 个实验因素——红外强度、红外作用时间、吐出压力对像素遮盖率以及涂覆高度的影响,实验参数见表 3。

表 3 响应面优化试验设计及结果
Tab. 3 Results of response surface experiments

序号	红外强度 $X_1/\%$	红外作用时间 X_2/ms	吐出压力 X_3/MPa	遮光率/ $\%$	像素高度/ μm
1	100	2 400	0.018	95	2.178
2	90	2 800	0.01	85	1.978
3	90	2 400	0.014	90	1.866
4	100	2 000	0.014	83	2.236
5	90	2 400	0.014	90	1.887
6	90	2 400	0.014	91	1.862
7	90	2 400	0.014	88	1.916
8	80	2 000	0.014	80	2.010
9	80	2 400	0.010	70	1.945
10	100	2 800	0.018	95	2.221
11	100	2 400	0.010	72	2.049
12	90	2 000	0.010	75	1.951
13	90	2 800	0.018	100	2.085
14	80	2 800	0.014	94	2.056
15	80	2 400	0.018	95	2.042
16	90	2 000	0.018	95	2.066
17	90	2 400	0.014	92	1.907

使用 Y_1 表征遮光率($\%$), Y_2 表征像素涂覆高度(μm), 对实验结果进行多元二次回归, 得到的回归方程如式(1)和式(2)所示:

$$Y_1 = -380.834 + 8.655X_1 - 0.035X_2 + 12.675X_3 - 6.25 \times 10^{-5}X_1X_2 - 18.750X_1X_3 - 0.703X_2X_3 - 0.045X_1^2 + 1.304 \times 10^{-5}X_2^2 - 2.445 \times 10^5X_3^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 15.624 - 0.234X_1 - 2.758 \times 10^{-3}X_2 - 49.95X_3 - 3.875 \times 10^{-6}X_1X_2 - 0.212X_1X_3 - 1.406 \times 10^{-3}X_2X_3 + 1.382 \times 10^{-3}X_1^2 + 6.564 \times 10^{-7}X_2^2 + 1.720.312X_3^2, \quad (2)$$

式中: X_1 为红外强度, X_2 为照射时间, X_3 为吐出压力。

4.2.2 回归模型分析

经拟合得到的遮光率模型与像素高度模型的拟合度(R^2)分别为 0.981 6、0.976 7, 表示分别有 98.16% 和 97.67% 的数据可以用回归模型解释, 表现出较高的可靠性。对实验结果进行方差分析, 结果如表 4 所示。考虑多个因素对响应值的影响, 通常用方差计算得到的 P 值衡量。当 $P < 0.05$ 时显示该项为显著, 反之则不显著。遮光率

表 4 方差分析表
Tab. 4 ANOVA table

项	平方和		均方		F 值		P 值	
	Y_1	$Y_2 \times 10^{-3}$	Y_1	$Y_2 \times 10^{-3}$	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
模型	1 138.17	220	126.46	24	25.76	32.67	0.000 1	0.000 1
X_1	4.50	50	4.50	50	0.92	67.40	0.370 2	0.000 1
X_2	185.28	0.741	185.28	0.741	37.74	1.00	0.000 5	0.350 5
X_3	770.28	25	770.28	25	156.91	33.72	0.000 1	0.000 7
X_1X_2	0.25	0.961	0.25	0.961	0.051	1.30	0.827 9	0.292 2
X_1X_3	2.25	0.289	2.25	0.289	0.46	0.39	0.520 1	0.552 0
X_2X_3	5.06	0.020 25	5.06	0.020 25	1.03	0.027	0.343 7	0.873 3
X_1^2	86.69	81	86.69	81	17.66	108.68	0.004 0	0.000 1
X_2^2	18.35	46	18.35	46	3.74	62.70	0.094 5	0.000 1
X_3^2	64.45	3.190	64.45	3.19	13.13	4.31	0.008 5	0.076 6
残差	34.36	5.185	4.91	0.740 7				
缺失度	25.56	2.774	8.52	0.924 8	3.87	1.53	0.111 9	0.335 7
纯误差	8.80	2.411	2.20	0.602 7				
总和	1 172.53	220						

模型以及像素高度模型的 P 值分别为 0.001 和 0.005,远小于 0.05,均具有较高的显著性。以上两模型的缺适度分别为 0.112 和 0.336,均大于 0.05,不显著。由图 8 可知,各响应面模型的预测值与实测值均匀分布在 $Y=X$ 的两侧,说明二者间的相关性较高。综合以上实验数据的拟合结果证明模型有效,可用于准确预测响应值。

由表 4 和图 9 可知,在像素遮光率预测模型中,并不是所有的项都显著, X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 交互项均不显著。红外强度(X_1)不显著,红外时间(X_2)与吐出压力(X_3)显著。在 X_2 与 X_3 中, X_3 的 F 值远大于 X_2 ,说明吐出压力比红外作用时间更显著。 X_1 、 X_3 的二次项均显著。在像素高度预测模型中,红外作用时间(X_2)不显著,红外强度(X_1)和吐出压力(X_3)显著。在 X_1 与 X_3 中, X_1 比 X_3 更显著。 X_1 、 X_2 的二次项显著。

通过求解回归方程可知,使遮光率与像素高度均满足暗点化维修标准的最优实验条件为红外强度 87.9%、红外作用时间 2 488 ms,吐出压力 0.015 8 MPa。此条件下遮光率和像素高度的理论预测值分别为 94.9% 和 1.913 μm 。经实验

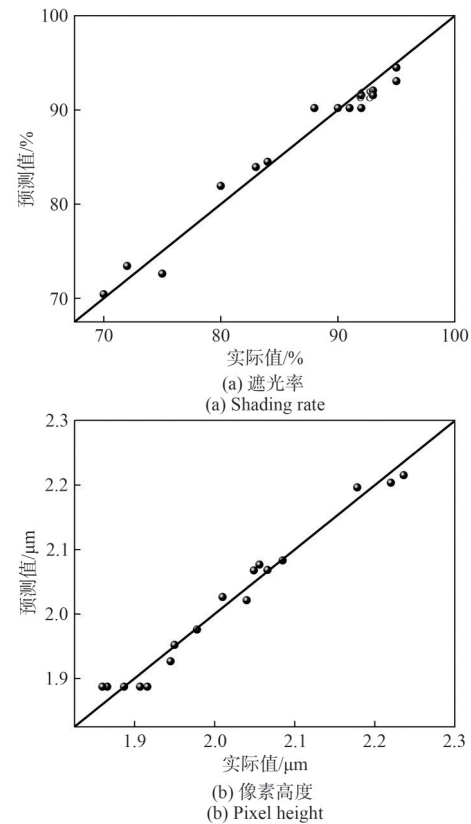


图 8 预测值与实际值对比

Fig. 8 Predicted and actual values

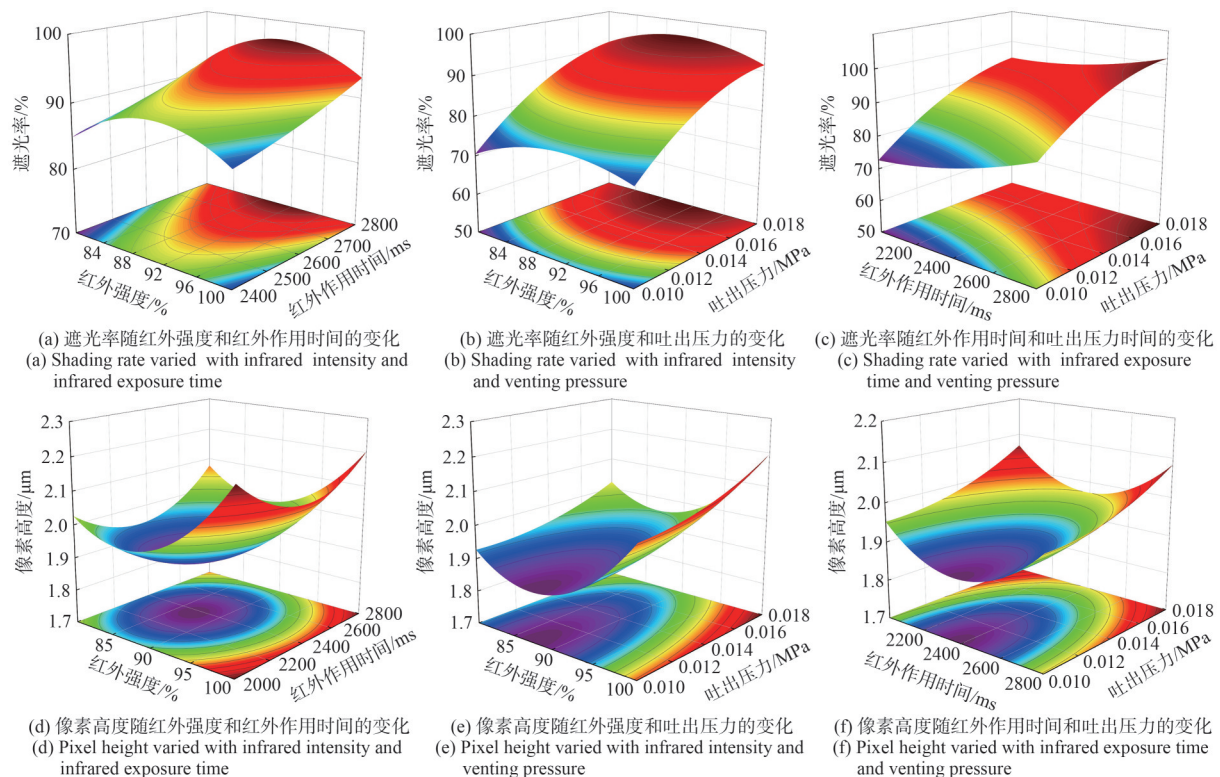


图 9 各因素对遮光率和像素高度的交互作用的三维响应面图

Fig. 9 3D response surface plots of the interaction of various factors on shading rate and pixel height

验证,此条件下遮光率和像素高度的平均值分别为93.2%和1.895 μm ,与理论预测值相差均在2%以内,表明回归模型有效、可靠。

5 结 论

在TFT-LCD制造行业中,首次在阵列基板的维修中使用特殊材料进行涂覆遮盖维修,通过响应面方法找到最优的实验参数,克服可能产生的不良,成功实现暗点化维修。结合实验结果,主要得出以下结论:

(1)成功建立并通过实验验证了采用遮光维修方法实现TFT基板暗点化的可行性,打破了

传统维修方法仅适用于部分不良维修的局限性,极大拓宽了暗点化维修的范围,也解决了以往因维修方式导致产品设计受限的问题。

(2)红外强度、红外作用时间以及吐出压力都会影响暗点化维修的成功率。通过响应面分析法找到对于某款75 in (1 in=2.54 cm) ADS显示模式产品的最优涂覆参数,得到最优试验条件为红外强度87.9%、红外作用时间2 488 ms,吐出压力0.015 8 MPa。量产修复成功率达98%,为其他产品的方法导入提供了依据。

(3)本方法通过引入红外加热灯对维修环境适当改善,使得维修时间从6 min降低为60 s,维修品质大幅上升,为维修领域品质提升带来新思路。

参 考 文 献:

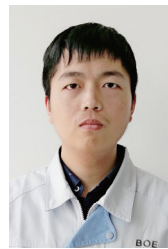
- [1] 马群刚. TFT-LCD原理与设计[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2020.
MA Q G. *Principle and Design of TFT-LCD* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020. (in Chinese)
- [2] 杨敏. TFT-LCD亮点缺陷的分析与研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
YANG M. Analysis and research of TFT-LCD bright defect [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] KARIMIFARD S, MOGHADDAM M R A. Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: a critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 696.
- [4] 康跃君. 液晶显示屏故障诊断与维护的研究[D]. 苏州:苏州大学,2009.
KANG Y J. Liquid crystal display defect analysis and repair method research [D]. Suzhou: Soochow University, 2009. (in Chinese)
- [5] 黄雅纹,陈再良. TFT LCD常见点缺陷的检测与修复[J]. 现代电子技术,2012,35(23):189-191.
HUANG Y W, CHEN Z L. Detection and repair of point defects in TFT LCD [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(23): 189-191. (in Chinese)
- [6] 魏平玉,李涛,徐敏,等. 黑矩阵扩散法修复亮点理论模型及影响因素分析[J]. 液晶与显示,2016,31(2):164-172.
WEI P Y, LI T, XU M, *et al.* Model of BM diffusion method and effect actors analysis in bright dot repair [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 164-172. (in Chinese)
- [7] 吴国东,乔律华,韩海滨,等. ITO区黑化法修复亮点理论模型及工艺参数分析[J]. 液晶与显示,2021,36(2):246-257.
WU G D, QIAO L H, HAN H B, *et al.* Theoretical model and process parameter analysis of ITO area blackening method for repairing bright spot [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 246-257. (in Chinese)
- [8] 蒋耀华,陈思. 黑矩阵遮挡法修复液晶显示屏亮点成功率的研究[J]. 现代显示,2013(5):10-12.
JIANG Y H, CHEN S. The research about the success ratio of using black matrix covering method to repair TFT-LCD's bright pixel defect [J]. *Advanced Display*, 2013(5): 10-12. (in Chinese)
- [9] 马宝平,陈再良. LCD常见点缺陷的修复[J]. 苏州大学学报(工科版),2009,29(4):70-72.
MA B P, CHEN Z L. LCD point defect repair [J]. *Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition)*, 2009, 29(4): 70-72. (in Chinese)
- [10] 乔健,吴振铎,彭信翰,等. Micro-LED芯片激光去除机理及工艺参数优化[J]. 光学精密工程,2024,32(9):1360-1370.

- QIAO J, WU Z D, PENG X H, *et al.* Mechanism for laser-induced damage bad chip of Micro-LED and optimization of processing parameters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(9): 1360-1370. (in Chinese)
- [11] 严迎燕,吴建东. 紫外光辐射交联光学胶的研究进展[J]. 化工管理,2024(17):97-100.
YAN Y Y, WU J D. Research progress of ultraviolet radiation crosslinked optical adhesives [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2024(17): 97-100. (in Chinese)
- [12] 王世林. 远红外加热技术的发展与现状[J]. 甘肃轻纺科技,1997(2):33-35.
WANG S L. Development and current status of far infrared heating technology [J]. *Gansu Textile Technology* 1997(2): 33-35. (in Chinese)
- [13] 黎关超,王超,何伟,等. TFT-LCD行业异物不良改善研究[J]. 液晶与显示,2017,32(10):787-793.
LI G C, WANG C, HE W, *et al.* Research and improvement of particle defect in TFT-LCD industry [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(10): 787-793. (in Chinese)
- [14] 黄鸣,黎锡流,李泽坤. 微波与远红外线加热在食品加工中的应用[J]. 广州食品工业科技,2002,18(2):60-63.
HUANG M, LI X L, LI Z K. The application of technology during food processing microwave and far-infrared ray [J]. *Guangzhou Food Science and Technology*, 2002, 18(2): 60-63. (in Chinese)
- [15] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
LI L, ZHANG S, HE Q, *et al.* Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(8): 41-45. (in Chinese)

作者简介:



谈思云,女,硕士,工程师,2024年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事液晶面板不良的修复工作。E-mail:tansiyun@boe.com.cn



刘浩然,男,学士,资深工程师,2010年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事液晶面板阵列工序的检测维修工作。E-mail:liuhaoran@boe.com.cn