

平板显示用光学胶性能分析及应用

郑国兵^{1,2}, 陈云昌^{1,2}, 孙磊^{1,2}, 王璐^{1,2}, 邱旭蒙^{1,2}, 符昭邦^{1,2}, 邹一杰^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016; 2. 国家平板显示工程技术研究中心, 南京 210016)

摘要: 研究比较了有机硅和丙烯酸两大类液态光学胶胶水的性能差异。介绍了不同性能参数对贴合工艺和质量的影响程度;同时针对目前液态光学胶在应用过程中存在的开胶、气泡、MURA黄斑问题,提出了具体的解决办法,为胶水广泛应用提供有力的技术支撑。

关键词: 液态光学胶;有机硅;丙烯酸;显示MURA;气泡

中图分类号: TN141;TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0251-07

Performance Analysis and Solution to Application Problems of Optical Adhesive

ZHENG Guobing^{1,2}, CHEN Yunchang^{1,2}, SUN Lei^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, QIU Xumeng^{1,2},
FU Zhaobang^{1,2}, ZOU Yijie^{1,2}

(1. *The 55th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Nanjing 210016, CHN;*
2. *National Flat Panel Display Engineering Technology Research Center, Nanjing 210016, CHN*)

Abstract: The different kinds of LOCA (liquid optical clear adhesive) between organic silicon and acrylic adhesive were compared, and the influence of different performance parameters on bonding process and quality were introduced. The solutions were proposed for the questions, such as degumming, bubbles, MURA in LOCA's application, providing forceful technical support for the widely application of adhesive.

Key words: liquid optical clear adhesive; organic silicon; acrylic; display MURA; bubble

引 言

近年来,随着市场需求的不断扩大,液晶显示屏和功能面板玻璃或触摸屏的贴合已成为提高显示器环境适应性能和可靠性的有效措施^[1-3],尤其在车载显示领域,全贴合技术已经成为主流技术,目前主要采用液态光学胶(LOCA/OCR)作为全贴合的介质。从材料成分方面可分为有机硅和丙烯酸

两类,从固化方式角度可分为UV固化、热固化、UV+湿气固化、UV+热固化等方式,从贴合工艺方式角度又可分为灌胶贴合、图形点胶贴合、面涂胶贴合等。文中从胶水的主要性能方面对两类胶水进行介绍和比较,并针对目前LOCA应用过程中存在的开胶、气泡、MURA黄斑等问题,进行了深入的研究,分析了问题的原因并针对性地给出解决办法。

收稿日期:2020-05-15

作者简介:郑国兵(1989—),男,工程师,从事显示器件的加固技术研究;(E-mail:zheng81297@163.com)

陈云昌(1990—),男,工程师,从事显示器件的加固技术研究;

孙磊(1983—),男,工程师,从事显示器件的加固技术研究。

1 胶水性能对比

有机硅胶水的主要成分为聚二甲基硅氧烷,丙烯酸类胶水的主要成分为聚氨酯或橡胶改性丙烯酸酯。胶水的性能主要包含固化前液态胶水的性能和固化后固态胶水的指标,液态胶水最主要的性能指标为粘度,粘度直接决定贴合工艺。固态胶水的性能较多,主要分为光学、力学和温度性能方面^[4-7],具体情况如表1所示。

表1 两类胶水主要性能对比

Tab.1 Main properties of two kinds of adhesive

性能	有机硅	丙烯酸	影响的事项
粘度(液态)/(mPa·s)	>300	>1 500	涂胶方式
折射率	1.40~1.42	1.48~1.52	显示质量
固化收缩率/(%)	0.1~0.5	1~3	MURA黄斑
粘接强度/MPa	0.01~0.6	0.05~0.8	长期信赖性
温度性能/℃	-50~200	-55~120	长期信赖性

1.1 粘度

胶水粘度大小直接决定贴合工艺。粘度主要取决于胶水本身的配方,改变单体的种类和比例可显著改变粘度。丙烯酸类胶水一般通过增加活性小分子的含量来降低粘度,有机硅一般通过适当增加甲基硅油的含量来降低粘度。两类胶水的粘度分布和贴合工艺选择可参照表2。

表2 胶水粘度和贴合工艺表

Tab.2 Adhesive viscosity and bonding technology

粘度/(mPa·s)	涂胶方式	胶水种类
小于1 000	灌胶、刮涂	有机硅
2 000~3 500	鱼骨图点胶模式	有机硅、丙烯酸
3 000~5 000	Slit coating	有机硅、丙烯酸
8 000以上	丝网刮涂	有机硅

1.2 折射率

LOCA/OCR的光学性能主要体现为透过率和折射率,透过率一般都大于97%,折射率根据胶水成分不同有所不同,有机硅类胶水一般为1.40~1.42,高折射率的有机硅胶水极少。丙烯酸类胶水一般为1.48~1.52。折射率在胶水选型时主要影响界面反射率指标和显示效果,界面反射率的计算方法见公式(1)。

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

其中: n_1 和 n_2 分别为两种介质的折射率。

当贴合盖板玻璃的折射率为1.52时,液晶屏偏光片的折射率为1.57。使用1.52的丙烯酸胶水进行贴合时,由于光的传播界面发生变化,界面反射率为0.025%,使用折射率为1.4的有机硅胶水贴合时,界面反射率为0.494%,明显高于折射率为1.52的丙烯酸胶水。两者的显示效果对比如图1所示。



图1 不同胶水的显示效果对比图

Fig.1 Comparison of the display effect of different adhesives

1.3 固化收缩率

LOCA从液态到固态是一个体积缩小的过程,固化收缩率是反映体积缩小程度的物理量。丙烯酸类胶水一般为UV固化,在适当波长和光强的UV光照射下,光引发剂迅速生成自由基或离子,进而引发预聚物和活性稀释剂聚合交联成网状结构,从而完成与被黏材料的黏接^[8-9]。在丙烯酸胶水的UV固化过程中存在两个产生固化收缩的因素:(1)单体分子间都会由反应前的远程范德华力变成反应后的共价键力,分子间距离由反应前的不饱和双键范德华力作用距离0.3~0.5 nm缩短为聚合后的共价键距离0.154 nm,至少减小了一半^[10-11]。分子间距变化如图2所示,因此,聚合反应中的体积收缩难以避免;(2)存在大量的应力无法松弛。这是由于UV固化反应的反应时间十分短,通常在几十秒内完成聚合反应,无法使高分子链运动到松弛状

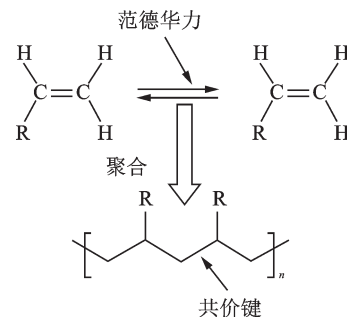


图2 丙烯酸胶水固化分子间距变化示意图

Fig.2 Curing diagram of acrylic adhesive

态。两个方面共同造成了UV固化的丙烯酸胶水的收缩率较大,一般在1%~4%之间。

有机硅胶水一般为热固化,属于硅氢加成反应,含有Si-H键的化合物与不饱和的有机物发生加成反应生成有机硅化合物。典型的硅氢加成反

应固化机理如图3所示^[12]。硅氢加成一般是热固化反应,有充足的时间让高分子链舒展到平衡状态,不会出现蜷曲状态,可保证固化收缩率尽可能的小。有机硅胶水的固化收缩率较小,通常小于0.5%。

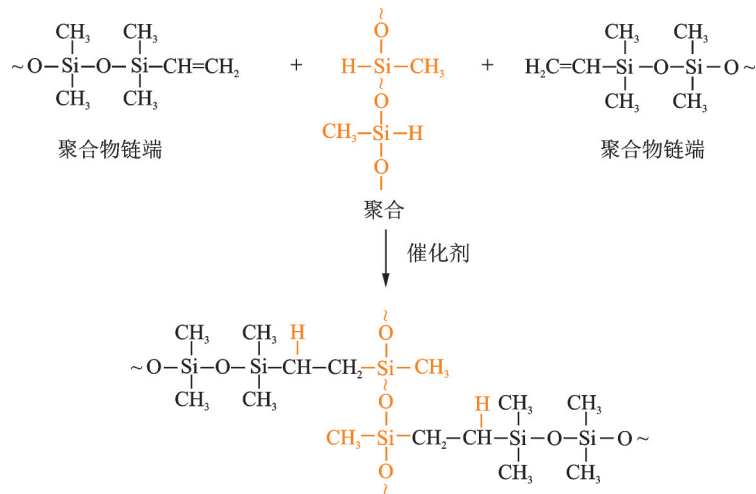


图3 有机硅胶水固化示意图

Fig.3 Curing diagram of organic silicon adhesive

胶水的固化是一个从液态到固态体积减小的过程,在固化过程中,胶水从边缘往中间收缩,如图4(a)所示。液晶屏边缘受到由于胶水固化收缩产生的作用力导致液晶屏盒厚发生微米级的变化,从而边缘出现显示不均匀的现象,即液晶屏显示MURA,如图4(b)所示。

1.4 粘接强度

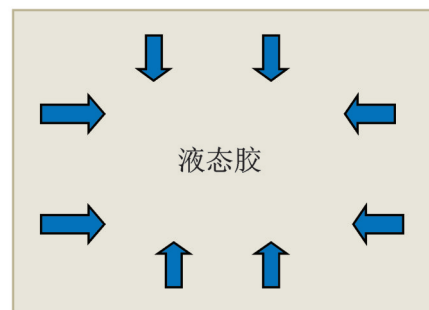
粘接强度是LOCA胶水十分重要的力学性能,其大小直接决定适用环境和领域,当粘接界面不同时,粘接强度会有很大的差别,在胶水选型时需要根据贴合介质的不同选择合适的胶水。

影响粘接强度的因素主要有三点:

(1)粘接界面,主要包括胶水和界面的润湿情况(接触角越大越好),界面的极性和表面张力,表面处理情况等;

(2)胶黏剂本身,主要是胶黏剂的化学结构,分子量及分子量分布以及硬度,一般胶水硬度越大,粘接强度越大。但是硬度越大可能会带来贴合MURA或者环境适应性差等问题。两类胶水粘接强度和硬度的大致对应关系见表3^[7]。有机硅和丙烯酸胶水均可以对粘接强度进行调节,以满足客户的需求;

(3)贴合工艺,主要包括胶层厚度、固化工艺等。可通过适当调节贴合工艺,提高粘接强度。



(a) 液态胶水固化示意图



(b) MURA现象

图4 液态胶水固化导致的不良

Fig.4 Bad phenomenon caused by curing process of LOCA

1.5 温度性能

LOCA的温度性能由胶水本身决定,是LOCA应用环节十分重要的指标,直接决定其应用环境,是评估其能否长期使用的关键因素,丙烯酸类胶水

表 3 胶水硬度和粘接强度对应关系

Tab.3 Relationship between hardness and bonding strength

硬度	丙烯酸类胶水/ MPa	有机硅胶水/MPa
Shore00 以下	<0.1	<0.08
Shore00~50	0.1~0.5	0.1~0.4
Shore50 以上	>0.5	>0.4

注:以上数据来自各类胶水规格书

的主要成分是改性丙烯酸树脂,耐低温性能优异,一般可以满足 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的使用环境,高温性能良好,长期使用温度大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,能满足车载产品使用要求。有机硅胶水的耐低温性能一般,通常经过改性后能满足 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求,极少数胶水能满足 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境要求。但是其耐高温性能极其优异,长期使用温度能达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于主键Si-O键的键能达到 438 kJ/mol ,而丙烯酸的C-C主键的键能只有 348 kJ/mol 。通过热力学测试明显看出两者的差异,测试结果如图5所示。丙烯酸胶水的热分解温度为 $276.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而有机硅的热分解温度高达 $318.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相差超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。有机硅的耐高温性能明显优于丙烯酸。

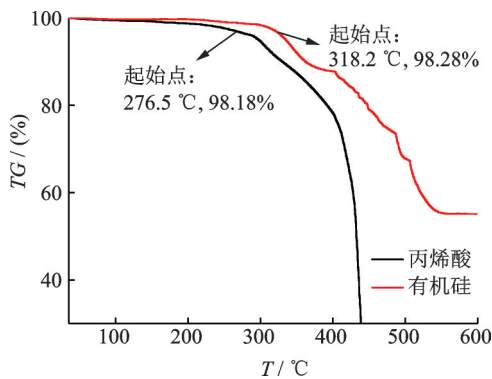


图5 丙烯酸和有机硅胶水的TGA测试结果

Fig.5 TGA test results of acrylic and organic silicon adhesive

2 LOCA 应用过程中的问题及解决方案

2.1 开胶

LOCA 在实际应用和试验过程中最常见的问题是开胶(脱胶),如图6所示。

开胶现象通常出现在高低温试验或长期振动颠簸的环境中,主要原因是胶水的粘接强度偏小,同



图6 液晶屏组件脱胶现象

Fig.6 Degumming phenomenon of LCD module

时各类材料的热膨胀系数不一致,其中玻璃的理论热膨胀系数为 $7\sim 10\text{ ppm}$,偏光片的理论热膨胀系数为 $90\sim 110\text{ ppm}$,胶水的膨胀系数一般在 $200\sim 300\text{ ppm}$,在高低温环境下各类材料的膨胀收缩程度不同,当胶层受到的Z方向的分力或者X/Y方向的剪切力超过粘接力时,就会出现开胶现象,尤其当液晶屏尺寸较大时,液晶屏本身还会有一定的形变,用胶水将液晶屏和盖板玻璃贴合后,改变了液晶屏的固有形态,在后续的使用中液晶屏会往贴合前的形变方向缓慢松弛,恢复到其最自然的状态,在这个过程中会持续不断的给胶层施加作用力,一旦胶水的粘接力无法阻挡液晶屏的形变,就会出现开胶现象。另外部分产品长期在振动环境下使用,由于振动应力的作用,也可能出现开胶现象。

有机硅类胶水可以调配得很软,硬度很低,对液晶屏的固化应力很小,但此时粘接力也会很低,一般小于 0.1 MPa ,因此采用有机硅胶水贴合的产品较容易出现开胶现象。研究发现,在胶水无法更换的情况下可以通过四周补强、增加表面处理两方面来提高粘接力,降低开胶风险。

2.1.1 四周补强

在胶层四周进行补强一般有两种方式:(1)在贴合层四周涂布RTV胶水,将液晶屏和触摸屏粘接在一起,RTV的强度一般大于 1 MPa ,远远大于贴合胶的强度,在高低温试验中将屏和玻璃粘住,降低开胶的可能性。热固化有机硅胶水多采用这种方式;(2)在胶层四周涂布框胶,既是围坝也是补强,同时可提高厚度均匀性,通过四周补强措施可有效降低开胶的风险。

2.1.2 表面处理

液晶屏和多功能玻璃在长期存放和搬运过程中容易出现表面能的不均匀性,表面通常由气体吸附层、油污尘埃污染层、氧化层等组成,影响胶水在

界面的扩散和浸润,不易形成次价键或主价键。等离子清洗是有效解决以上问题的方法,工作原理为对气体施加足够的能量使之离化成为等离子状态,利用这些等离子体的活性来处理样品表面,实现清洁的状态,在完成清洗的同时还可以提高表面的浸润能力,提高胶水的附着力,从而提高粘接强度,试验表明增加等离子清洗工艺后,有机硅胶水的粘接强度能提高15%以上,具体数据见表4。

表4 等离子清洗对粘接强度的影响

Tab.4 Effect of plasma cleaning on bonding strength

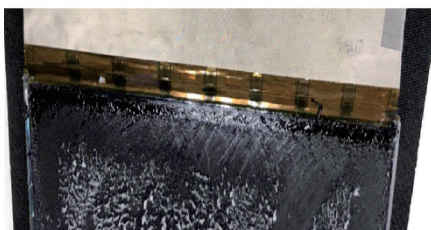
粘接界面	无等离子清洗/ MPa	有等离子清洗/ MPa
偏光片+玻璃	0.2	0.24
偏光片+触摸屏	0.25	0.29
偏光片+PMMA	0.18	0.21

2.2 气泡

贴合后的产品,在后期长时间使用过程中出现气泡,如图7(a)所示,将液晶屏和功能玻璃分离后如图7(b)所示,边缘胶水呈现液化化现象。



(a) 模块角上气泡



(b) 边缘胶水液化化现象

图7 长期使用后的气泡现象

Fig.7 Bubbles after long-term usage

出现气泡现象的原因是胶水自身的长期可靠性存在问题,在长时间使用后,尤其是高温高湿环境下使用后,胶水出现分解现象,产生小分子物质,胶层逐步转变为液态,空气进入该区域,出现气泡。

气泡在短期使用过程中一般不会出现,出现时间根据使用环境的不同,一般2~5年内会出现,针

对这类问题需要在材料选型阶段进行充分试验验证,确保胶水使用寿命满足产品要求。通常的解决办法是采用目前业内常用的双85试验进行可靠性验证。研究可利用阿伦尼乌斯总结的化学反应率与温度关系的经验公式^[13-14]来预测胶水的使用寿命。考虑湿度应力的作用,经过变形修正后得到阿伦尼乌斯扩展方程见公式(2):

$$AF = \exp\left\{\left(\frac{E}{k}\right) \times \left[\left(\frac{1}{T_0}\right) - \left(\frac{1}{T_s}\right)\right] + (RH_s^n - RH_0^n)\right\} \quad (2)$$

k为玻尔兹曼常数 8.617×10^{-5} eV/K; T_0 为常态下的绝对温度; T_s 为加速状态下的绝对温度; RH_0 为常态下的相对湿度; RH_s 为加速状态下的相对湿度; n 为常数,一般取2~3; E 为激活能(单位eV),不同胶黏剂对于不同的失效模式有不同的激活能,目前取经验值0.8 eV带入计算。

由公式(2)可知,反应的活化能 E 对加速系数成指数倍影响,因此需要比较精确地确定 E 的大小,一般可通过热重点斜法或反应动力学模型计算^[15]。研究取0.8 eV进行计算,可得出不同使用环境下的加速系数见表5,再根据双85试验的失效时间即可推算出胶水的实际使用寿命。

表5 使用寿命预测表

Tab.5 Life expectancy

双85失效时间/h	实际使用环境	加速系数	预计使用寿命/年
200	22℃, 50%RH	347	7.9
500	40℃, 60%RH	54	3.1
1 000	50℃, 70%RH	21	2.4

由表5可知,实际使用环境的温度对胶水的使用寿命起决定性因素,在南方炎热的夏天,室外能达到50℃,70%RH的条件,一年按照100天达到50℃,70%RH的使用环境计算,通过1 000 h的双85试验,才能确保产品的使用寿命达到8.7年。

2.3 MURA 黄斑现象

2.3.1 固化后短期内出现MURA黄斑

贴合后的液晶屏在固化后常温或高温条件下出现MURA黄斑现象,如图8所示。这一现象是由于胶水的固化收缩率过大,在固化过程中液晶屏受到的应力过大导致。除了更换胶水外,丙烯酸类UV胶和有机硅类热固化胶水均可通过优化固化工艺来降低固化收缩应力,改善固化后短期内出现的

MURA 黄斑现象。

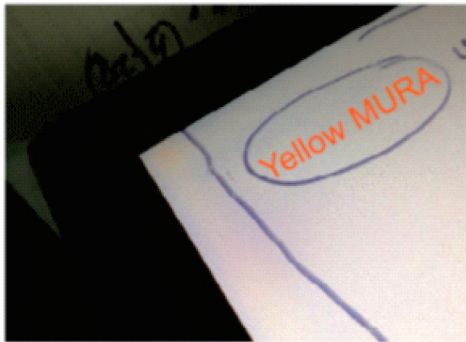


图 8 MURA 黄斑现象

Fig.8 MURA macular phenomenon

采用 UV 固化的胶水通过控制光固化过程可以在一定程度上缓解固化收缩的产生,减小高分子链的应力松弛,降低固化收缩率^[15]。“soft-start”光引发模式是在反应初始阶段使用较低的功率密度光照,一般小于 50 mW/cm^2 ,时间一般在 20 s 以内。然后变换为高功率的密度光照或逐步阶梯式增加光照功率密度完成剩余的光固化过程。“soft-start”光引发模式在一定固化厚度范围内能够有效地减缓收缩应力,并保持较高的固化程度和力学性能^[17]。“pulse-delay”固化模式是在低功率密度光照向高密度光照转换的过程中插入一个等待的时间^[18]。与“soft-start”持续光照模式相比,“pulse-delay”在等待的过程中,胶水由于应力松弛作用,能够部分释放因固化收缩而产生的应力^[19]。优化 UV 固化工艺后,固化收缩率可降低 $0.3\% \sim 1\%$ 。采用热固化方式进行固化的有机硅胶水,在固化温度和时间的选择上,初期应尽可能采用低温固化,以延长凝胶化时间;在凝胶化后的固化反应中,应采用逐步分级的阶梯型固化工艺,固化完成后的冷却过程应放缓,使交联结构的固化树脂慢慢冷却收缩。

2.3.2 长期使用后出现 MURA 黄斑

还有部分产品在长时间使用后出现图 9 的 MURA 黄斑现象,一般在进行老化试验或者长时间使用(超过半年)后出现四边黄框现象,出现该现象的主要原因为胶水存在后固化现象。部分胶水在固化阶段,固化反应率只有 $80\% \sim 85\%$,此时胶水的性能指标已能达到规格书的参数,不影响正常使用,剩余的 $15\% \sim 20\%$ 在后续时间会继续固化和交联,胶水硬度会增加,对液晶屏产生作用力,同时胶水在后续长期使用过程中,其后固化的速度很慢,

需要较长时间才能观察到黄斑 MURA 现象。

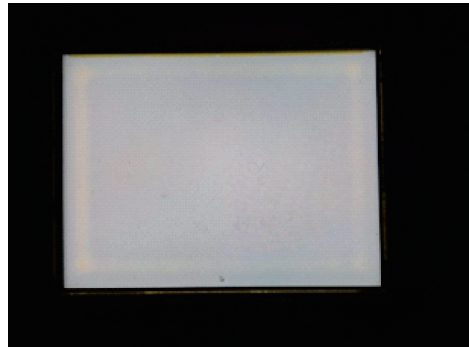


图 9 MURA 黄斑现象

Fig.9 MURA macular phenomenon

对于此类 MURA 黄斑现象通常可通过增加胶层厚度来改善,胶层厚度增加,在后固化过程中的固化应力可以在胶层内部互相抵消一部分,降低对液晶屏的作用力,从而改善 MURA 黄斑现象。利用高温热空气加速老化试验可快速复现 MURA 黄斑试验,只改变胶层厚度,设计试验进行比较,结果如图 10 所示。

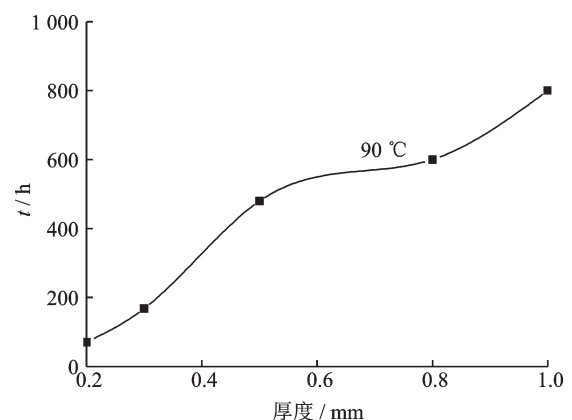


图 10 胶层厚度和出现 MURA 黄斑现象的时间对应关系
Fig.10 The relationship between the thickness of adhesive and MURA macular

试验结果表明,通过高温加速老化试验能快速复现 MURA 黄斑现象,温度越高出现的时间越短,同时胶层厚度越厚,越不容易出现 MURA 黄斑。当胶层厚度达到 1 mm 时,根据不含湿度修正的公式(2)推算,在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下出现 MURA 黄斑现象是 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的 25.7 倍。一年按照 100 天达到 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的使用环境计算,通过 800 h 的 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温加速热空气老化试验,则在比较严苛的实际使用环境下至少需要 8.5 年才会出现 MURA 黄斑现象,满足车载产品使用要求。

3 结 论

使用LOCA将液晶屏和触摸屏(盖板玻璃)进行全贴合除了提供更好的显示效果外,触摸屏也因与显示屏紧密结合使强度有所提升,同时可以做到防尘水汽和窄边框,因此使用水胶进行全贴合是LCD行业未来的发展趋势。LOCA可以广泛应用在车载屏幕、工控设备、平板电脑、医疗设备、智能手机、广告机等领域。文章比较了两大类胶水的性能差异,并就胶水的每项性能指标对应用的影响程度进行了阐述和比较。同时就在实际应用过程中出现的脱胶、气泡、MURA黄斑问题进行了深入的研究,通过研究找到了问题的原因,并提出了可行的解决方案。根据解决方案进行胶水选型和贴合工艺改进,可使得胶水的使用寿命和显示质量能满足车载产品在较为严苛的条件下使用8年以上的需求,为后续胶水更加广泛的应用提供了有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 张宇,王改秀,连彩婷.邦定技术在军用加固显示器设计方面的应用[J].光电子技术,2015,35(3):179-183.
- [2] 曹允,王勇,范彬,等.加固液晶显示器关键技术[J].光电子技术,2011,31(2):73-77.
- [3] 刘昌禄.综合显示与加固平板显示器的技术发展[J].情报指挥控制系统与仿真技术,2004,26(2):68-71.
- [4] 严乔,弓欣,刘子学,等.触摸屏绑定用光学胶特性研究[J].液晶与显示,2017,32(4):275-280.
- [5] 李超.一种可用于电容式触摸屏贴合用的液态光学胶水的制备与性能[D].广州:华南理工大学,2014.
- [6] 张利利,李志才,侯毅,等.有机硅液体光学透明胶水的制备与研究[J].有机硅材料,2017,31(1):1-5.
- [7] 徐靖,孙婧,张伟.触摸显示屏用液态光学胶专利技术研究进展[J].精细与专用化学品,2019,27(5):14-17.
- [8] 唐薰,潘山存,陈洪,等.UV辐射固化胶黏剂综述[J].化学与粘合,2003,6:296-299.
- [9] 寇亮亮,薛惠芸,廖毅彬,等.液态光学胶的固化收缩率研究[J].厦门大学学报,2014,53(3):378-382.
- [10] 李聪,袁妍,刘仁,等.低收缩率光固化反应研究进展[J].涂料工业,2017,47(16):81-87.
- [11] Yamasaki L C, Moraes A G D V, Barros M, et al. Polymerization development of "low-shrink" resin composites: Reaction kinetics, polymerization stress and quality of network [J]. Dental Materials, 2013, 29(9): 169-179.
- [12] 黄文润.液体硅橡胶[M].成都:四川科学技术出版社,2009:3-8.
- [13] 侯文华.化学动力学的建立和发展概略[J].大学化学,2007,22(3):28-36.
- [14] 周鑫,丁孝均,魏威.加速老化试验方法评估典型橡胶密封材料贮存寿命的准确性研究[J].航天器环境工程,2014,31(3):287-291.
- [15] 张晓军,常新龙,陈顺祥,等.氟橡胶密封材料热氧老化试验和寿命评估[J].装备环境工程,2010,9(4):35-38.
- [16] Singh A K, Niyogi U K, Sabharwal S, et al. Shrinkage studies in electron beam curable polyurethane pressure-sensitive adhesive [J]. J. Adhes. Sci. Technol., 2013, 27:1511-1524.
- [17] Taubock T T, Feilzer A J, Buchalla W, et al. Effect of modulated photo-activation on polymerization shrinkage behavior of dental restorative resin composites [J]. Eur. J. Oral Sci., 2014, 122:293-302.
- [18] Calheiros F C, Daronch M, Rueggeberg F A, et al. Effect of temperature on polymerization stress and degree of conversion [J]. Dent. Mater., 2014, 30:613-618.
- [19] 宋彩雨,王磊,张斌,等.降低光固化收缩的研究进展[J].高分子材料科学与工程,2017,33(10):175-182.
- [48] LYU M, Wang H, Li G, et al. Exploit imaging through opaque wall via deep learning [J]. Neural and Evolutionary Computing, 2017, 1708.07881:1-11.
- [49] LYU M, Wang H, Li G, et al. Learning-based lensless imaging through optically thick scattering media [J]. Advanced Photonics, 2019, 1(3): 036002-1-036002-10.
- [50] Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(20), 2328-2331.
- [51] Li S, Deng M, Lee J, et al. Imaging through glass diffusers using densely connected convolutional networks [J]. Optica, 2018, 5(7): 803-813.
- [52] Zhao J, Sun Y, Zhu Z, et al. Deep learning imaging through fully-flexible glass-air disordered fiber [J]. ACS Photonics, 2018, 5(10): 3930-3935.
- [53] Kakkavaa E, Rahmanib B, Borhanian N, et al. Imaging through multimode fibers using deep learning: The effects of intensity versus holographic recording of the speckle pattern [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 52: 101985-1-101985-7.
- [54] 于享义,乔木,刘红林,等.基于深度学习的非视域成像[J].光学学报,2019,39(07):0711002-1-0711002-7.
- [55] Li Y, Xue Y, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach towards scalable imaging through scattering media [J]. Optica, 2018, 5(10):1181-1190.
- [56] Yang M, Liu Z, Cheng Z, et al. Deep hybrid scattering image learning [J]. Journal of Physics D, 2019, 52(11): 115105-1-115105-6.
- [57] Sun Y, Shi J, Sun L, et al. Image reconstruction through dynamic scattering media based on deep learning [J]. Optics Express, 2019, 27(11): 16032-16046.
- [58] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Learning-based focusing through scattering media [J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4358-4362.
- [59] Turpin A, Vishniakou I, Seelig J D. Light scattering control in transmission and reflection with neural networks [J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30911-30929.
- [60] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 104(10): 100601-1-100601-4.

(上接第250页)