

基于有限元的Mini-LED灭灯分析

刘硕, 吴仁杰, 杨贤, 刘阳, 马可, 朱红丽, 周昊, 孙海威

引用本文:

刘硕, 吴仁杰, 杨贤, 等. 基于有限元的Mini-LED灭灯分析[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 53–61.

LIU Shuo, WU Jen-chieh, YANG Xian, et al. Analysis of Mini-LED light-off phenomenon based on FEM simulation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 53–61.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种LED灯串故障自检测电路的设计与实现

Design and implementation of a fault self-detection circuit for LED string

液晶与显示. 2019, 34(4): 402–409 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193404.0402>

一种基于LCD-LED双调制显示器的HDR图像显示方法

HDR image display algorithm based on LCD-LED dual modulation HDR display

液晶与显示. 2019, 34(1): 14–23 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193401.0014>

基于双层屏幕的防窥可切换显示技术

Research of dual cell switchable privacy display technology

液晶与显示. 2019, 34(12): 1155–1160 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193412.1155>

LED阵列发光特性仿真和对比分析

Simulation and comparative analysis of LED arrays in light-emitting characteristics

液晶与显示. 2017, 32(12): 961–967 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173212.0961>

侧入式局域动态调光背光聚光特性研究

Spotlight characteristics of local dynamic dimming for side-lit backlight

液晶与显示. 2018, 33(11): 905–910 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0905>

文章编号:1007-2780(2020)01-0053-09

基于有限元的 Mini-LED 灭灯分析

刘 硕*, 吴仁杰, 杨 贤, 刘 阳, 马 可, 朱红丽, 周 昊, 孙海威

(北京京东方显示技术有限公司, 北京 100176)

摘要: Mini-LED 背光模组具有精准的局域控光能力且可实现超薄 HDR 显示, 目前其已成为显示行业研究热点之一。针对 Mini-LED 在点灯过程中发生的灭灯现象, 从灯板制作工艺入手, 探讨了灭灯现象发生的机理。并基于有限元模拟方法, 结合灯板制作工艺、灯板结构等实际情况合理建立了 Mini-LED 模组仿真模型, 模型仿真温度值与实测值对比误差在 5% 以内。将灯板在高温试验条件下极限状态温度场导入力学仿真模块进行力学模拟, 获得极限状态下的热应力值大小及分布, 并进一步推算出芯片所受最大推力值。将芯片所受推力值模拟结果与实测结果进行对比后, 发现模拟结果位于实测结果的上下四分位数之间, 且大于实测结果平均值, 符合实际情况。基于模拟结果, 改善了芯片锡膏, 在芯片最大推力提高 15% 的情况下, 实测芯片推力值的下四分位数值大于模拟值, 且 Mini-LED 灭灯的发生概率从 1.13×10^{-4} 降低到了 1×10^{-5} 以下, 改善效果明显。

关键词: 有限元仿真; Mini-LED; 灭灯; 热-力耦合模拟

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20203501.0053

Analysis of Mini-LED light-off phenomenon based on FEM simulation

LIU Shuo*, WU Jen-chieh, YANG Xian, LIU Yang, MA Ke,
ZHU Hong-li, ZHOU Hao, SUN Hai-wei

(Beijing BOE Display Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: On account of its thinner display module and accurate local dimming ability, the Mini-LED technology has become a popular research direction in display field. Aiming at the lighting-off phenomenon through the light board aging process, the reason and mechanism of the lighting-off phenomenon is explored beginning with the manufacture process of the LED board. Based on the FEM simulation method, combined with the manufacture process and the structure of the Mini-LED light board, the simulation model is established reasonably, and the temperature simulation results showed the error of the model is within 5% compared with the measured results. In order to get the thermal stress field of the light board under extreme situation, the simulation result of the light board temperature field under high temperature operation is imported into the mechanics simulation. Compared with the measured results, the simulation result of the maximum chip thrust is between the upper quartile and the lower quartile, and is bigger than the average value of the measured results, which

收稿日期: 2019-04-03; 修订日期: 2019-06-18.

* 通信联系人, E-mail: lius@boe.com.cn

show the simulation is accord with the actual situation. The solder paste is developed based on the simulation, and the result shows that the probability of the light-off phenomenon is reduced to under 1×10^{-5} from 1.13×10^{-4} when the maximum chip thrust is increased by 15%, which shows the improvement effect is obvious.

Key words: FEM simulation; Mini-LED; light-off; thermo-mechanical coupling

1 引言

Micro-LED 显示是目前显示行业最有潜力的显示技术之一, Mini-LED 技术作为 Micro-LED 技术的过渡技术, 已成为显示行业研究的热点。Micro-LED 的芯片尺寸小于 $50 \mu\text{m}$, 而 Mini-LED 的芯片尺寸在 $100 \sim 500 \mu\text{m}$, Mini-LED 除了可以独立显示, 还可以作为 LCD 的背光光源^[1-2]。Mini-LED 背光可为 LCD 显示的局域调光技术提供几百至上万分区, 为局域调光技术更精准地控制 LCD 显示提供了可能^[3]。

随着 HDR 标准的进一步提高, 对 Mini-LED 背光的亮度也提出了更高的要求, 亮度提升导致 Mini-LED 灯板的功率进一步提高, 随之而来的是灯板的发热量增加、温度升高。灯板温度的升高不仅会导致 LED 寿命的显著下降^[4-7], 也导致了灯板内部的热应力的显著升高, 使灯板在高温下出现板翘曲、局部灭灯等不良现象。

本文选取 Mini-LED 灭灯问题作为研究对象, 从 Mini-LED 灯板的结构和制作工艺出发, 对灯板的灭灯机理进行分析。并根据 Mini-LED 灯板的结构, 建立有限元仿真模型, 通过有限元热力学耦合对 Mini-LED 背光模组点亮过程中, 灯板受热膨胀产生的应力、芯片所受到的推力进行了计算。将芯片推力值进行实测, 与模拟值进行比较, 并基于比较结果, 调整芯片制作工艺参数, 并将改善前后灭灯数据进行统计, 验证结果改善程度。

2 Mini-LED 灭灯现象

Mini-LED 背光模组室温下点灯过程中、高温试验点灯过程中, 在不受外力影响的情况下, 可能会在模组点亮后的一段时间内出现个别芯片灭灯的现象。灭灯芯片大多分布在灯板的边界位置, 如图 1 所示。

由于 Mini-LED 灯板功率较高, 热功率较大, 在模组状态下点亮后, 灯板产生的热量不能及时传出, 且在灯板点亮到灭灯过程不会受到外力影响, 因此考虑灭灯现象可能与灯板点亮过程产生的热应力相关。

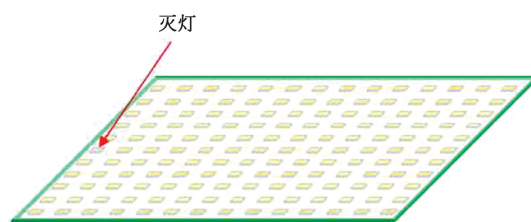


图 1 Mini-LED 灭灯示意图

Fig.1 Schematic diagram of Mini-LED light-off

3 灯板制作工艺及灭灯机理探讨

3.1 Mini-LED 灯板制作工艺

Mini-LED 灯板的制作过程应用了 COB (Chip On Board) 工艺, 即将灯板的发光芯片直接集成在印刷电路板上。Mini-LED 灯板的基板为多层印刷电路板 PCB 板, PCB 板是导电铜层通过菲林处理曝光、蚀刻, 产生所设计的各层导电路径后, 各导电层之间插入绝缘材料压合而成, 压合后在裸露的铜层电路, 进行防焊油墨的印刷, 主要起保护导电铜层和提高灯板反射率的作用。同时, 在防焊油墨印刷时, 应避免将焊接芯片的焊盘位置, 防止后期芯片焊接不良、虚焊。在完成以上工艺后需要对焊盘位置进行化金处理, 防止在印刷线路板制作完成到芯片焊接的过程中, 焊盘被氧化腐蚀。

在灯板制作完成后, 灯板发光芯片的集成过程用到了回流焊工艺。回流焊工艺需要将灯板的焊盘位置涂刷焊接锡膏, 随后在相应位置贴放发光芯片, 经固化后利用外部热源将灯板加热, 使锡膏能够再次流动, 使焊盘和发光芯片之间产生可靠的电气连接和机械连接, 以达到芯片焊接的目的^[8-9]。

发光芯片焊接完成后,为防止芯片受到外力的影响,保证发光芯片到扩散板之间的混光距离(OD),还需在基板以及芯片上部喷涂一定厚度的透明保护胶。保护胶喷涂完成后,在灯板上侧会形成一个平整的平面。Mini-LED 制作工艺如图 2 所示。

3.2 Mini-LED 灯板灭灯机理分析

Mini-LED 灯板保护胶喷涂工艺在室温环境下进行,因此认为在室温环境下,灯板和保护胶处于零应力状态,芯片所受到应力为 0。模组状

态点亮后(尤其是在高温信赖性测试点亮状态下),Mini-LED 灯板的温度迅速上升,由于灯板产生热量无法及时散去,灯板处于高温状态,导致灯板受热膨胀,由于保护胶热膨胀率大于灯板基板材料热膨胀率,灯板基板和保护胶之间会产生轻微位移,导致芯片受到保护胶的挤压推力,如图 3 所示。当芯片所受推力达到一定强度,将会使芯片与灯板基板之间的焊锡产生破裂,造成发光芯片与焊盘间电气连接失效,发生灭灯现象。

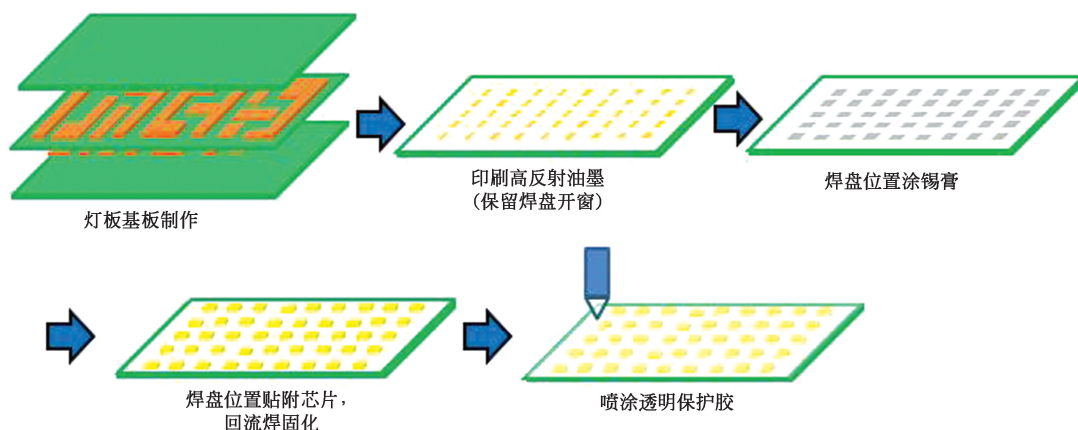


图 2 Mini-LED 制作工艺流程

Fig.2 Manufacture process of Mini-LED light board

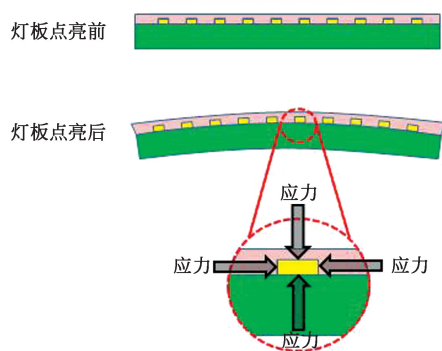


图 3 芯片受应力示意图

Fig.3 Schematic diagram of chip stress

4 有限元模型建立及仿真

针对 Mini-LED 背光灯板的灭灯不良现象,有限元进行建模分析的思路是:首先使用热学仿真模块建立热学仿真模型,并对所建立模型进行仿真计算,将所计算结果与实测结果进行对比,验

证分析模型的可靠性。之后将热学仿真所得到的灯板的温度场导出到力学仿真模块,进行力学耦合仿真,以获得灯板由于热膨胀作用所导致的热应力最大值。

4.1 热学分析模型建立及可靠性验证

Mini-LED 显示模组的架构由图 4 所示,其中 Mini-LED 灯板用导热双面胶贴附在铁背板

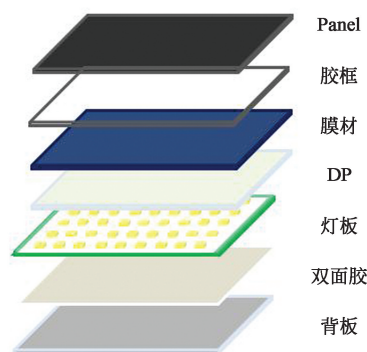


图 4 Mini-LED 模组基本架构示意图

Fig.4 Schematic diagram of Mini-LED module structure

上,光源 Mini-LED 灯板出射后经扩散板调制光源、各层膜材后光透过显示屏幕,使显示屏处于点亮状态。由于 Mini-LED 灯板结构的特殊性,需将灯板所含材料属性进行分析。灯板的基板主要由导电铜层和绝缘层 FR-4 两种材料组成,这两种材料的热膨胀系数如表 1、表 2 及图 5 所示^[9]。由于灯板受热区间主要在低温区($<90^{\circ}\text{C}$)环境下,考虑到在低温区该两种材料的膨胀系数比较

表 1 FR-4 随温度变化热膨胀系数

Tab.1 CTE of FR-4 with temperature

温度	FR-4 CTE/ ^{-1}C
27	13.62E-6
37	14.19E-6
47	14.77E-6
57	15.38E-6
130	31.62E-6
220	73.6E-6

表 2 铜箔随温度变化热膨胀系数

Tab.2 CTE of copper foil with temperature

温度	铜箔 CTE/ ^{-1}C
27	16.65E-6
77	16.70E-6
127	17.12E-6
177	17.51E-6
227	17.85E-6

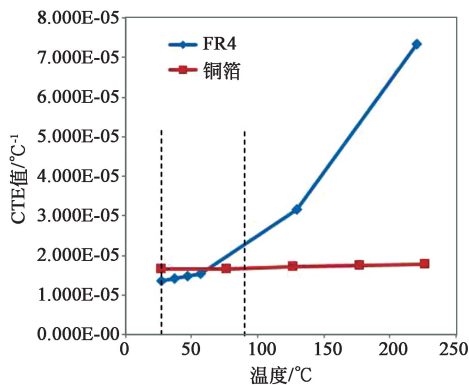


图 5 FR4 与铜箔 CTE 值对比图

Fig.5 Comparison diagram of FR-4 and copper foil CTE with temperature

接近,因此可将灯板基板模型进行简化,建模时不再将 FR-4 层和铜箔层分开考虑。由于在低温区保护胶的热膨胀系数在 1×10^{-4} 左右,与灯板基板材料热膨胀系数值相差较大,为分析灯板与保护胶之间膨胀应力,将灯板分为灯板基板层和保护胶层进行建模。

由于模组散热主要方式为自然对流散热,其控制方程为:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = - \nabla p + \nabla \cdot \tau - \rho g, \quad (1)$$

其中: ρg 项为自然对流浮力项,考虑到模组散热所处空间气体密度变化不大,由布辛尼斯克模型对模型进行计算,即在控制方程中认为流体密度为温度的线性函数,在其他求解方程中,认为流体密度为常数。控制方程中,浮力项的密度公式为:

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \beta (t - t_0), \quad (2)$$

其中: ρ_0 为周围环境空气密度, t_0 为周围环境空气温度, β 为周围环境空气的热膨胀系数。

在自然对流状态下,通常由瑞利数作为流态的判据,可对流体的流态进行判断:

$$Ra = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\nu \alpha} = 1.20 \times 10^8, \quad (3)$$

其中: g 为重力加速度 9.8 m/s^2 , β 热膨胀系数取 3.66×10^{-3} ,温差 ΔT 取 30 K ,运动黏度 $\nu = 1.62 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,热扩散系数 $\alpha = 2.19 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,特征长度 $L = 0.3 \text{ m}$ 。

由瑞利数计算可知模型瑞利数小于 10^9 ,因此将该模型的自然对流散热过程,流体流态设置为层流状态。

Mini-LED 灯板发热量,由积分球测试得出灯板出光功率值 52.08 W ,灯板输入功率为 102.38 W 。假设灯板能量损耗全部转换为热能,可知灯板热功率为 50.3 W 。设置模型初始环境温度为 25°C ,与空气自然对流,并考虑模组竖直放置状态下的重力影响,设置重力方向为 Y 轴负向。灯板中铜箔层与 FR4 层复合,计算得出灯板综合导热率为 $66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。模组中各部品热物性参数如表 3 所示,背板为冲压板材,辐射率较低,取 0.26 ;其他非金属材料辐射系数均在 0.9 左右^[10],基于此将非金属材料设置辐射系数为 0.9 。

表 3 热模拟各部品热物性输入参数^[10]

Tab.3 Thermal parameters of each component thermal in simulation^[10]

部品名称	部品材料	导热系/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	辐射系数
背板	SECC	72	0.26
双面胶	PSA	1	
灯板	FR4	66	
保护胶	硅基树脂	0.16	
扩散板	PS	0.15	0.9
胶框	PC	0.23	
膜材	PET 基材	0.2	
显示屏	玻璃	1.2	

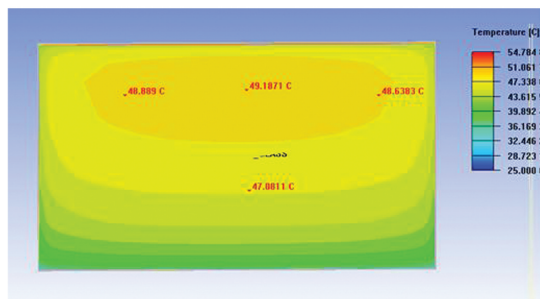
为验证模拟可靠性,选用 685.8 mm(27 in)Mini-LED 模组进行温度实测,如图 6 所示。同时为保证测试结果严谨性,温度测试在模组点亮状态下分别在模组的正面和反面共取 13 点,用热电偶进行温度监测。在热模拟软件中,利用探针 Probe 工具可测量出相应温度测点的模拟值,将模拟结果与实测结

果进行对比,以确认热学分析模型的可靠性。模拟结果与实测结果的对比如表 4 及图 7 所示。

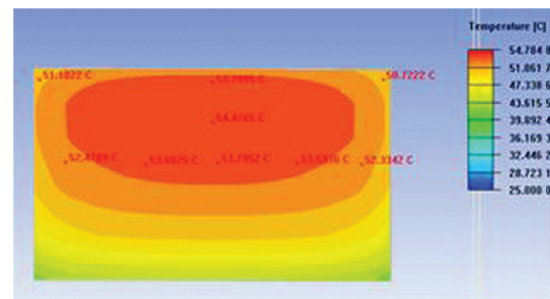
表 4 模拟温度与实测温度对比值

Tab.4 Comparison of simulation and measurement

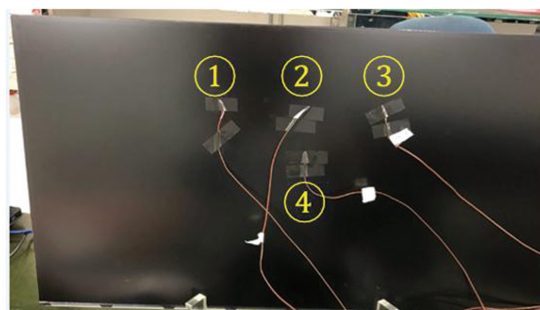
测试位置	模拟温度/℃	实测温度/℃	差异值
1	49.8	48.9	0.9
2	49.3	49.2	0.1
3	50.1	48.6	1.5
4	46.0	47.1	1.1
5	51.9	51.1	0.8
6	54.7	53.8	0.9
7	50.4	50.7	0.3
8	54.7	52.5	2.2
9	55.8	53.6	2.2
10	55.0	53.8	1.2
11	54.5	54.5	0
12	54.9	53.6	1.3
13	54.2	52.3	1.9



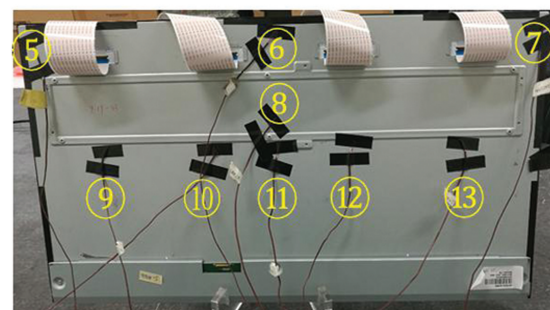
(a) 模组正面温度仿真结果
(a) Front view of module thermal field



(b) 模组背面温度仿真结果
(b) Back view of module thermal field



(c) 模组正面温度测试图
(c)Temperature measurement of front side module



(d) 模组背面温度测试图
(d) Temperature measurement of back side module

图 6 模组温度模拟结果与实测示意图
Fig.6 Simulation result and measuring schematic of MDL

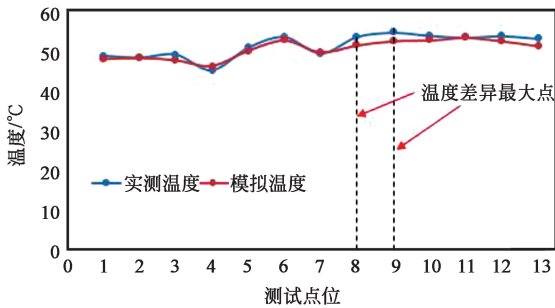


图 7 实测温度与模拟温度值对比图

Fig.7 Comparison diagram of simulation and measurement

由实测结果与模拟结果的对比可知,模拟所得到温度分布与实测值基本吻合,最大差异点误差为:

$$\frac{|54.7-52.5|}{|54.7|}=4.02\% \quad , \quad (4)$$

由于模拟结果与实测结果小于 5%,模拟在误差范围内,因此认为热学分析模型是可靠的。

4.2 热力耦合有限元计算分析过程

为模拟在极限状态下,灯板与保护胶表面的芯片受力,模拟条件选则高温试验条件下环境温度为 60℃。通过已建立模型,计算得到 60℃环境温度下模组温度分布如图 8 所示。

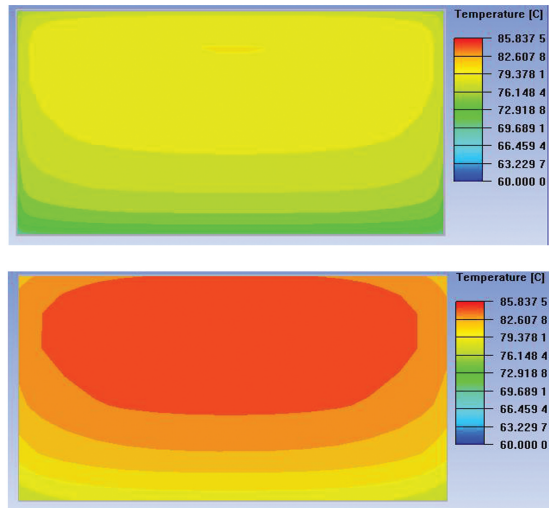


图 8 高温试验条件下模组温度分布模拟结果

Fig.8 Thermal field of module under high temperature

在灯板受热膨胀变形过程中,灯板与双面胶有可能会产生分离,为去除背板固定影响,模拟灯板受热状态下灯板基板和保护胶所产生的极限热

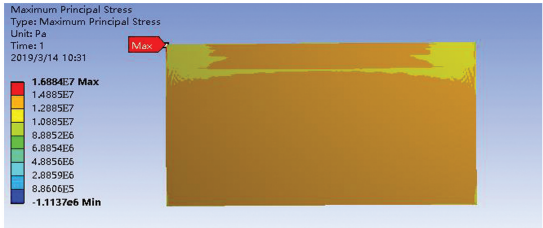
应力,力学模拟过程将灯板单独取出做应力分析。力学模型输入参数如表 5 所示。

表 5 力学模型部品力学性能输入参数

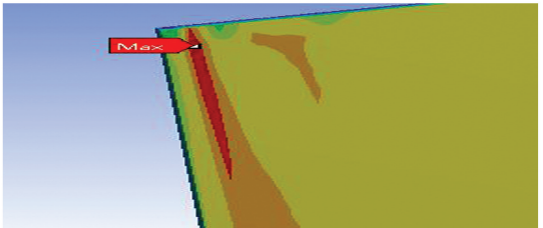
Tab.5 Mechanics parameters of each component in simulation

部品名称	杨氏模量/MPa	泊松比	CTE/℃ ⁻¹
灯板基板	1 840	0.11	16e ⁻⁶
双面胶	290	0.48	100e ⁻⁶

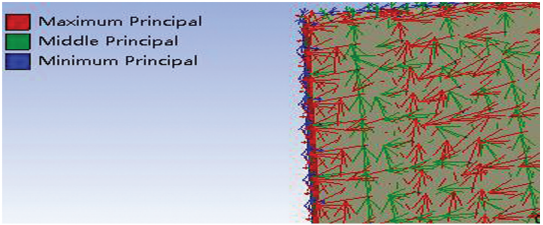
在力学模型中,设置灯板和保护胶接触为 Bonded,导入热模型中灯板基板及保护胶温度场作为负载进行热应力仿真。经计算,灯板基板表面的最大主应力分布如图 9 所示。由灯板最大主



(a) 灯板基板表面最大主应力分布
(a) Major principle stress field of light board on substrate surface



(b) 最大主应力最高处应力大小分布
(b) Major principle stress field in maximum position



(c) 最大主应力最高处应力方向分布
(c) Direction of major principle stress in maximum position

图 9 灯板基板表面最大主应力分布情况
Fig.9 Major principle stress of light board on substrate surface

应力分布可知,最大应力处位于灯板边界位置,通过主应力方向分布可知,最大主应力方向与灯板基板近似平行,且方向指向灯板短边。

由应力分布可对芯片受力进行计算,所用 Mini-LED 模组中所使用发光芯片型号为 1021,芯片尺寸为 $254\ \mu\text{m} \times 530\ \mu\text{m} \times 110\ \mu\text{m}$ ($10\ \text{mil} \times 21\ \text{mil} \times 4.3\ \text{mil}$),由最大主应力方向分布可知,芯片长边侧面垂直于最大主应力方向,芯片所受最大推力为: $0.0749\ \text{mm}^2 \times 16.88\ \text{MPa} = 1.26\ \text{N} = 128.48\ \text{gf}$ 。

4.3 改善过程及结果分析

对 Mini-LED 灭灯机理的分析结果可知,通过增加芯片与灯板基板间的锡膏附着力,可有效减小芯片的灭灯风险。在锡膏的熔点偏高的情况下,会导致在回流焊工艺过程中,未发生完全熔化,容易在锡膏中发生分层界面,对芯片附着力产生影响。改善方式主要是调整锡膏组成成分,略降低锡膏熔点,使锡膏在回流焊过程中熔融程度提高,从而使芯片附着力提升。为对比改善前后锡膏附着力,使用推力测试机对改善前后灯板芯片进行最大推力测试,所推芯片表面为芯片长边侧面。改善前后芯片最大推力数据如表 6 所示,改善后实测推力值与改善前推力值对比如图 10 所示。

表 6 锡膏改善前后芯片最大推力值对比

Tab.6 Comparison of maximal chip thrust value before and after solder paste improvement

测试组数	改善后推力/gf	改善前推力/gf
1	144.3	147.1
2	129.7	153.1
3	162.6	135.4
4	144.3	141.0
5	128.0	114.3
6	138.8	103.8
7	142.7	127.4
8	153.1	120.8
9	140.6	127.4
10	152.5	127.4
11	145.6	126.5
12	172.1	116.5
13	140.3	112.9

续 表

测试组数	改善后推力/gf	改善前推力/gf
14	141.3	121.7
15	152.2	115.4
16	149.2	121.0
17	128.2	124.7
18	135.6	136.9
19	136.4	115.6
20	121.4	97.5
最大值	172.12	153.08
最小值	121.39	97.47
平均值	142.94	124.33

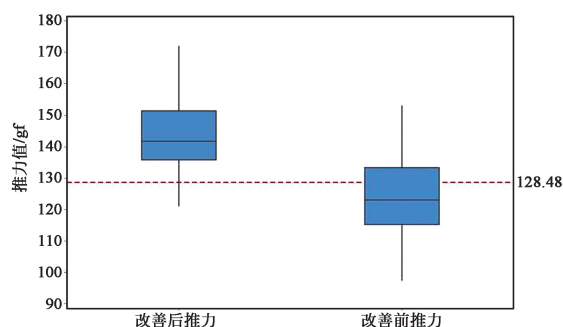


图 10 芯片锡膏改善前后芯片最大推力对比图

Fig.10 Comparison diagram of simulation and measurement before and after improvement

由实测结果与模拟值对比可看出,模拟值处于改善前实测值下四分位数与上四分位数范围内,且大于改善前芯片平均推力值,说明模拟所得数值符合实际情况,且在极限状态下,有较大风险发生灭灯现象。锡膏改善后,平均推力较之前增加 15%,且实测值的下四分位数值已大于芯片在极限状态下所受应力值,因此发生灭灯风险大大降低。

比较改善前后灯板灭灯的数据,对改善前灯板进行统计,在高温信赖性试验中,总共 116 640 颗芯片出现灭灯的芯片数量为 13 颗,灭灯出现概率为 1.13×10^{-4} ;对锡膏进行改善后,抽取改善样品进行信高温赖性测试状态下点灯检测,共 51 840 颗芯片,灭灯数量为 0,因此认为锡膏改善后灭灯出现概率降低至 $< 1 \times 10^{-5}$,改善效果

明显。

根据分析结果,除了直接提高芯片锡膏推力,可以降低灭灯风险外,温度也是决定基板与保护胶界面应力的关键因素。因此,提升模组的散热能力,降低模组整体温度,从而间接地降低基板与保护胶界面的应力值,同样是降低灭灯风险的有效途径。

5 结 论

本文针对 Mini-LED 灭灯现象,从 Mini-LED 灯板制作工艺入手,分析灭灯现象发生机理,得出灯板基板与导热胶之间产生的热应力是导致

Mini-LED 芯片脱焊灭灯的直接原因。基于有限元模拟方法,建立了 Mini-LED 模组的热模拟模型,经过与实测温度数据对比,模型模拟精度在 5% 以内。将模组在高温试验下的灯板温度分布,导入力学仿真模块进行模拟,得出极限状态下灯板基板上芯片所受最大推力为 128.48 gf,该数值位于实测芯片推力最大值下四分位数与上四分位数范围内,且高于实测芯片最大推力的平均值,因此灭灯现象发生风险较高,模拟结果与事实情况符合,具有可信性。基于此,将芯片锡膏进行改善后,芯片最大推力在提高 15% 的情况下,灯板的灭灯概率从 1.13×10^{-4} 降低至 $< 1 \times 10^{-5}$,改善效果明显。

参 考 文 献:

- [1] 吴诗聪. Mini-LED: 助力下一轮 LCD 技术发展[J]. 光电子技术, 2018, 38(3): 145-148.
WU S T. Mini-LED: Next round of LCD evolution [J]. *Optoelectronic Technology*, 2018, 38(3): 145-143. (in Chinese)
- [2] TAN G J, HUANG Y G, LI M C, *et al.* High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [3] CHEN H, SUNG J, HA T, *et al.* Locally pixel-compensated backlight dimming for improving static contrast on LED back-lit LCDs. [J]. *SID Symposium Digest of Technic Papers*, 2007, 38(1): 1339-1342.
- [4] 文尚胜, 陈建龙, 陈颖聪, 等. 基于共晶焊接工艺和板上封装技术的大功率 LED 热特性分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(4): 589-610.
WEN S S, CHEN J L, CHEN Y C, *et al.* Thermal analysis of high power LED eutectic welding process and COB packaging technology [J]. *Semiconductor of Optoelectronics*, 2014, 35(4): 589-610. (in Chinese)
- [5] 刘双喜. LED 片式 COB 光源的加速寿命试验及失效分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LIU S X. Accelerated Life Test and failure analysis of LED plate COB light source [D]. Wuhan: Huazhong University & Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 崔栋, 韩锐, 马青, 等. 5 寸车载高亮模组散热分析与应用[J]. 液晶与显示, 2017, 32(10): 765-771.
CUI D, HAN R, MA Q, *et al.* Thermal analysis and application of 5 in automotive high luminance module [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2017, 32(10): 765-771. (in Chinese)
- [7] 雷嗣军, 马青, 尹大根, 等. 基于 TRIZ 理论的 LED 背光源散热研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(1): 56-60.
LEI S J, MA Q, YOON D K, *et al.* Heat dissipation of LED back light units based on TRIZ [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2012, 27(1): 56-60. (in Chinese)
- [8] 王江, 连军红, 谢成洪. 回流焊对铁支架 SMD LED 产品的可靠性影响[J]. 电子工业专用设备, 2016, 45(11): 29-33, 42.
WANG J, LIAN J H, XIE C H. The research on the reliability of Iron frame SMD LED [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2016, 45(11): 29-33+42. (in Chinese)
- [9] 赵健. PCB 组件热-力分析的有限元模型及仿真[D]. 天津: 天津大学, 2016.
ZHAO J. The finite element modeling and simulation for thermomechanical analysis of PCBA [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W S. *Heat Transfer* [M]. Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



刘 硕(1992—),男,河北石家庄人,硕士,工程师,2017 年于北京交通大学获得硕士学位,主要从事 LCD 显示模组的设计及产品开发研究。E-mail: lius@boe.com.cn