

# Cree® XLamp® LED

## 焊点可靠性研究

### 目录

执行摘要 .....	1
前言 .....	2
材料和元件的组装 .....	4
测试板详细信息 .....	4
MCPCB 表面涂层 .....	5
焊料详细信息 .....	5
焊膏 .....	5
组装工艺设备 .....	6
焊料回流温度曲线 .....	7
X 射线成像 .....	8
热冲击测试 .....	10
热冲击测试数据表 .....	10
热冲击测试结果 .....	10
采用威布尔分析解读热冲击失效数据 .....	11
热冲击引发的失效模式 .....	14
焊点评估 .....	14
焊点微观结构 .....	14
结语 .....	20
参考文献 .....	20

### 执行摘要

凭借可靠性高、寿命长、用途广等特点，高功率 LED 在商业应用中的地位得以显著提升，超越了传统照明技术。商业、室内、室外和住宅应用对基于 LED 的灯具有着很高的期望。要求基于 LED 的灯具满足众多可靠性标准及能源之星® 认证有关长期流明维持率 (L70 > 35,000 小时)<sup>1</sup> [1] 的要求这一趋势日益增强。

LED 封装与印刷电路板 (PCB) 之间焊点的可靠性对于确保 LED 灯具的整体可靠性至关重要。本应用说明阐述如何使用热冲击测试来分析 Cree 高功率 XLamp LED 的焊点可靠性。热冲击测试是一种比热循环测试严苛得多的寿命测试程序，会明显加快失效机理的演变过程，因而能够比热循环测试更早地诱发潜在的失效状况。虽然在确定热应力作用下最有可能出现的系统失效点方面，热冲击测试具有启发性，但热冲击测试与实际工作环境之间并没有已知的相关性，因此不应将这些测试结果作为系统使用寿命或失效率的预测指标。

<sup>1</sup> 即工作 35,000 个小时后，灯具仍将提供其初始光通量的 70%。

前言

高功率 LED 的众多独特优势正在推动该技术在以往由传统照明技术占主导地位的市场中的广泛应用。基于 LED 的照明解决方案其主要价值主张之一便是长期可靠性。因此，利用相关数据实现长期高度可靠的性能对基于 LED 的照明应用至关重要。除 LED 芯片外，典型的 LED 封装包括各种基板材料、元件和密封剂，具体封装因不同的制造商而异。

图 1 所示三个焊点的完整性是确保热量从 LED 结点传递到散热器的关键所在。

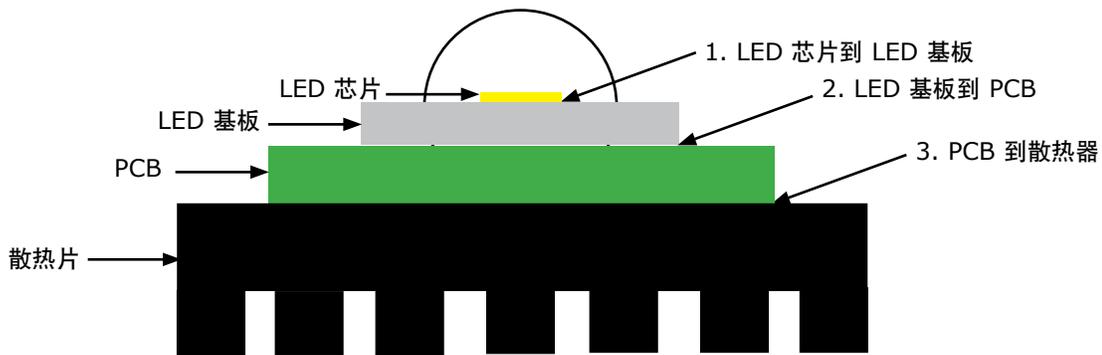


图 1: 确保热量从 LED 结点传递到散热器的重要焊点

LED 制造商负责验证 LED 芯片与 LED 基板之间焊点的完整性。PCB 和灯具组装公司负责验证另外两个焊点的完整性。

LED 基板与 PCB 之间焊点的完整性是 LED 产品长期流明维持率和可靠性的主要决定因素之一。焊点可靠性不仅取决于焊料合金，还取决于 LED 封装和 PCB 的金属镀层。此外，回流温度曲线对无铅焊点的性能也有着显著影响，因为它会影响焊点的润湿性能和微观结构。焊点损坏或存在缺陷会导致开路失效状况，进而导致灯具电气性能完全失效。

热冲击测试的升温速率远高于热循环测试，因此对焊点造成的损坏也严重得多。通过热冲击测试结果可以更深入地了解焊点的可靠性 [4]。本研究利用热冲击来评估所选高功率 XLamp LED 封装的焊点可靠性。

焊点的可靠性系指在指定的工作条件和给定的时间间隔下，焊点能够执行所需功能的可能性。出于健康和环境考虑，以往焊接应用所选用的合金 Sn63Pb37 共晶焊料（63% 的锡，37% 的铅）已被无铅焊料合金所取代。

焊点失效是电子封装中常见的一种失效模式 [2]。可靠焊点的形成取决于多个因素，例如，熔融焊料迅速且均匀地润湿表面涂层，并通过相互作用在接合界面形成一个厚度均匀的金属间化合物层的能力 [3]。焊点的润湿性能、界面化学和微观结构主要取决于回流温度。此外，焊点的整体可靠性由工作环境和系统设计共同决定。工作环境决定产品必须承受的极端温度、电源的开/关频率以及产生机械冲击或振动应力的可能性 [3]。

设计 LED 封装时应考虑如下因素。 [3]

1. LED 芯片和 LED 基板的物理性能
2. 材料选择
3. 焊点几何形状（焊盘尺寸和形状、焊盘相对于阻焊层的置放位置）
4. 散装焊料合金的机械性能
5. 在焊点/散热盘界面形成的金属间化合物的性质及其结构

对于 LED 封装焊接至 PCB 的可靠性，要考虑的关键特性是 LED 封装与 PCB 材料之间热膨胀系数的差异。工作条件的变化会导致因膨胀系数失配而产生不同的力。这些力可能会被一些机理（如 LED 基板弯曲）放大。对于坚硬 PCB 上较大的 LED 封装，距离 LED 封装中心最远的焊点内因膨胀失配而产生的应力最大。

图 2 显示了通常会影响 LED 焊点完整性的因素。以红色显示的因素与本研究相关。

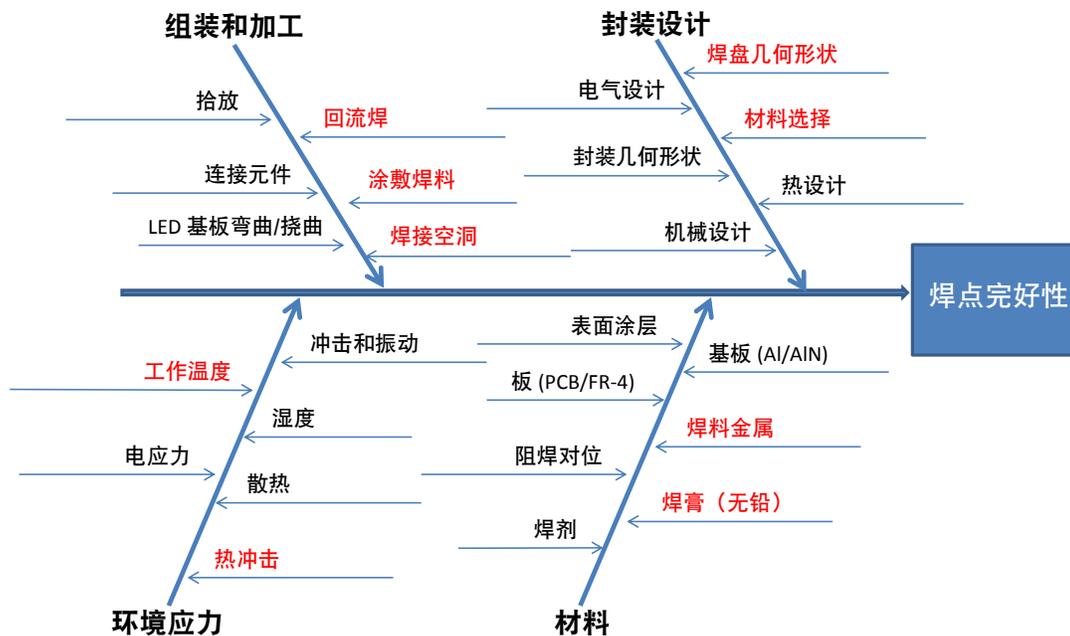


图 2: 通常会影响 LED 焊点完整性的因素

本应用说明阐述了 Cree 公司七款高功率 XLamp LED 封装 (XB-D、XP-G、XM-L 高压白、XM-L、MC-E、MT-G 和 XR-E) 中无铅焊接的焊点可靠性研究。每款 LED 封装的样品都安装在单层金属芯印刷电路板 (MCPCB) 上, 在 -40 °C 至 125 °C 的温度范围内进行热冲击测试, 停留时间为 15 分钟, 传热时间不足 20 秒。测试期间改变 LED 封装与 MCPCB 之间焊接空洞的数量, 以分析焊接空洞对焊点可靠性的影响。

### 材料和元件的组装

图 1 展示了本研究中用于每个 LED 封装的表面贴装技术 (SMT) 的回流焊工艺。



图 3: SMT 工艺流程图

高功率 XLamp LED 封装的尺寸如表 1 所示。

XLamp LED 封装	封装尺寸
XB-D	2.45 mm X 2.45 mm
XP-G	3.45 mm X 3.45 mm
XM-L	5.00 mm X 5.00 mm
XM-L HVW	5.00 mm X 5.00 mm
MC-E	7.00 mm X 9.00 mm
XR-E	7.00 mm X 9.00 mm
MT-G	9.00 mm X 9.00 mm

表 1: 焊点可靠性研究所选 XLamp LED 封装的尺寸

### 测试板详细信息

如图 4 所示, 本研究所选用的 MCPCB 可容纳十个 LED。在本研究中, 每款 LED 各二三十个, 即每款 LED 使用两三块 MCPCB 板。<sup>2</sup>

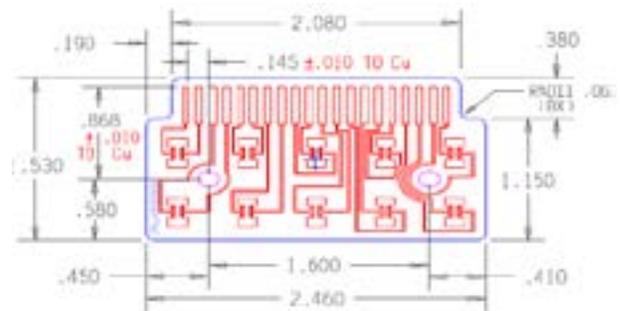
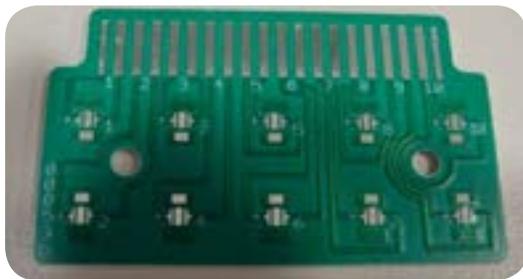


图 4: 安装有 XLamp XB-D LED 封装的 MCPCB 板

<sup>2</sup> MCPCB 由 Bergquist Company 开发研制, 图 5 中的绘图由其绘制。

本研究中使用的 MCPCB 板由阻焊层、铜电路层、薄导热绝缘层和金属芯基层组成。这些层层叠并粘合在一起，构成一个散热路径。图 1 所示为 MCPCB 的横截面。

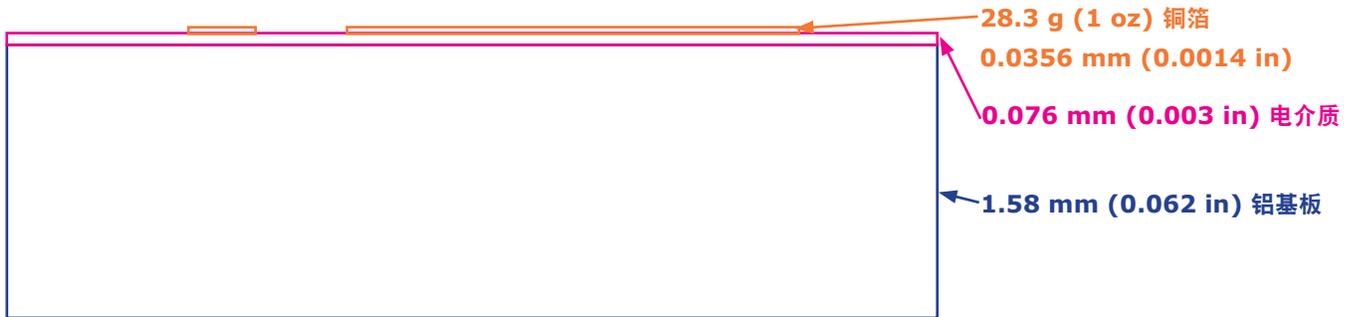


图 5: MCPCB 的横截面

### MCPCB 表面涂层

MCPCB 具有无铅热风整平 (HASL) 表面涂层, 可提供出色的可焊性及比诸如有机可焊性防腐剂 (OSP) 和浸泡 (沉锡、沉银) 等其他表面涂层更长的储存期限。

本研究采用的 MCPCB 层叠方式如下。

- XB-D - 1.58-mm (0.062-in) 铝基板, 3-mil (0.076-mm) 高温 (HT) 电介质, 113.4-g (4-oz.) 铜箔
- XP-G - 1.58-mm (0.062-in) 铝基板, 3-mil (0.076-mm) HT 电介质, 170.1-g (6 oz.) 铝箔
- XM-L - 1.58-mm (0.062-in) 铝基板, 3-mil (0.076-mm) HT 电介质, 170.1-g (6-oz.) 铝箔
- XM-L HVW - 1.58-mm (0.062-in) 铝基板, 3-mil (0.076-mm) HT电介质, 170.1-g (6-oz.) 铝箔
- MC-E - 1.58-mm (.062-in) 铝基板, 3-mil (.076-mm) HT电介质, 170.1-g (6 oz.) 铜箔
- XR-E - 1.58-mm (.062-in) 铝基板, 3-mil (.076-mm) HT电介质, 170.1-g (6 oz.) 铜箔
- MT-G - 1.58-mm (.062-in) 铝基板, 3-mil (.076-mm) HT电介质, 170.1-g (6 oz.) 铜箔

### 焊料详细信息

#### 焊膏

本研究使用 Indium 8.9 空气回流免清洗焊膏, 此焊膏专为适应锡-银-铜 (SAC) 无铅合金系统的高温而配制。<sup>3</sup> 焊膏成分包括 96.5% 的锡 (Sn)、3.0% 的银 (Ag) 和 0.5% 的铜 (Cu), 属第 3 类金属负载, 金属重量占总重量的 88.75%。<sup>4</sup>

<sup>3</sup> SAC305, Indium Corporation, [www.indium.com/solder-paste-and-powders/indium8.9-series/#whitepapers](http://www.indium.com/solder-paste-and-powders/indium8.9-series/#whitepapers)

<sup>4</sup> 金属负载是指焊料粉与助焊剂之比, 以金属重量所占百分比表示。金属负载取决于粉末类型和应用。

## 组装工艺设备

表 1 列出了本研究中使用的组装设备。

SMT 设备	SMT 设备详细信息
模板印刷机	MPM Momentum
拾放	JUKI FX - 3
回流炉	Heller 1809 MK III

**表 2: SMT 组装设备**

### 焊膏印刷

我们使用 MPM Momentum 模板印刷机来完成焊膏印刷<sup>5</sup>，印刷机模板厚度为 6 mil，模板框架尺寸为 73.7 cm x 73.7 cm (29 in x 29 in)。为获得本研究中限定的空洞数量，模板开孔尺寸比焊盘尺寸相应减小 10%。

### LED 置放

LED 组装过程中使用 JUKI FX-3 拾放机<sup>6</sup>。

### 回流焊

回流过程中使用 Heller 1809 MK III 对流回流炉<sup>7</sup>，回流炉有八个加热区和一个冷却区。所有板在对流空气净化环境下进行回流焊。

无铅焊料的物理和冶金性能及工艺参数（如熔点、表面张力，预热和峰值温度、浸泡和保温时间、焊料的润湿行为）都不同于铅基焊料。

Sn96.5 Ag3 Cu0.5 焊料的熔化温度介于 217 °C 至 219 °C 之间，明显高于 Sn63 Pb37 共晶焊料，后者熔点为 183 °C。这种较高的熔化温度要求实现润湿和毛细作用的峰值温度介于 235 °C 与 245 °C 之间。下限峰值温度仅适用于整体热质量较低的板或整块板上热质量差异不大的组件 [5]。此外，下限峰值温度可能还需要延长焊料浸泡时间，使焊料温度高于液相线 (TAL)。如果元件或板的可焊性不良，此下限峰值温度自身还会导致焊料毛细作用不良，润湿面积减小 [5]。因此，可靠焊点的形成取决于回流焊工艺的时间和温度曲线，以及熔融焊料迅速且均匀地润湿表面涂层，并通过相互作用在接合界面形成一个厚度均匀的金属间化合物层的能力 [3]。所有这些因素都会直接影响焊点的形成和可靠性能。Cree 建议回流焊后的焊点厚度约为 3 mil (75 μm)，焊点厚度可以使用带刻度盘的光学显微镜进行验证。本研究遵循了此项建议。

<sup>5</sup> Speedline technologies, [www.speedlinetech.com/mpm/dual-lane.aspx](http://www.speedlinetech.com/mpm/dual-lane.aspx)

<sup>6</sup> Juki Americas, [www.jukiamericas.com/placementmachines/fxseries/fx3.html](http://www.jukiamericas.com/placementmachines/fxseries/fx3.html)

<sup>7</sup> Heller Industries, [www.hellerindustries.com/reflow-1800.php](http://www.hellerindustries.com/reflow-1800.php)

**焊料回流温度曲线**

图 6 中的图表显示了本研究中使用的回流焊温度曲线。


**图 6: 无铅 (SAC) 焊料回流温度曲线。峰值温度: 240.98 °C, 维持高于 217 °C 的时间: 52.48 秒**

表 3 显示了本研究中使用的回流焊工艺参数。本研究中使用的 XLamp LED 符合 JEDEC J-STD-020C 标准。

温度曲线特点	研究温度曲线
平均升温速度 (Ts <sub>max</sub> 至 Tp)	1.25 °C/秒
预热: 最低温度 (Ts <sub>min</sub> )	150 °C
预热: 最高温度 (Ts <sub>max</sub> )	200 °C
预热: 时间 (ts <sub>min</sub> 至 ts <sub>max</sub> )	102.23 秒
维持高于此温度的时间: 温度 (T <sub>L</sub> )	217 °C
维持高于此温度的时间: 时间 (t <sub>L</sub> )	52.48 秒
峰值/分类温度 (Tp)	240.98 °C
与实际峰值温度 (tp) 相差 5 °C 以内的保持时间	3.28 秒
降温速度	1.78 °C/秒

**表 3: 本研究中使用的回流焊温度曲线。请注意, 所有温度均是在 LED 封装顶部本体表面上测量所得。**

回流焊后，目视检查焊点，查看是否存在以下焊点缺陷：虚焊、焊料凸点、锡桥或元件立起等。我们没有观察到这些缺陷。

此外，还使用实时X射线成像对 LED 封装进行检查，以进一步评估焊料的连接质量，查看 LED 封装与板之间是否存在任何焊接空洞。<sup>8</sup>

有关 Cree XLamp LED 拾放操作、焊接和处理以及热管理的更多详细信息，可从 Cree 网站提供的应用说明中获取。<sup>9</sup>

## X 射线成像

我们使用 Cougar Yxlon 实时X射线成像站评估焊料连接质量，查看是否存在断开触点、阳极/阴极触点与散热盘之间是否存在短路现象、焊盘与焊接空洞之间是否存在多余的焊料。<sup>10</sup> 焊接空洞通常由下列因素所致：

- 焊膏和助焊剂配方 — 与锡铅焊料相比，无铅焊料合金表现出更高的合金表面张力，因此更容易出现焊接空洞。无铅焊料中存在活性较高的助焊剂化学成分，会导致释气现象的增加，进而导致产生更多的空洞。
- PCB 表面涂层（如 OSP、沉银、金/镍、HASL）— 与铅基焊料相比，无铅焊膏的润湿性能较差，因此 PCB 表面涂层是形成空洞的关键因素。各种 PCB 表面涂层的实验表明，沉锡、沉银和无铅 HASL 涂层是无铅组装的首选 [13]。

图 7 显示了焊料完全覆盖和焊料部分覆盖在外观上的差异。在这些图像中，焊料以绿色显示。

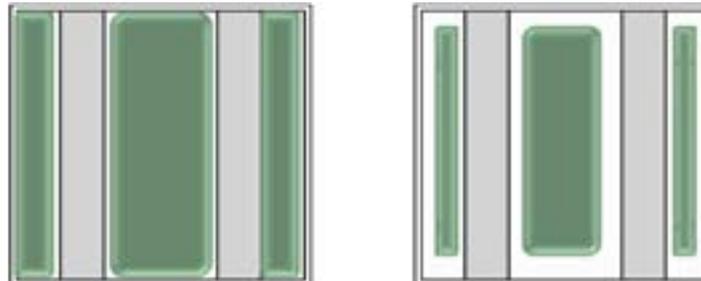


图 7: 焊料完全覆盖（左）、焊料部分覆盖（右）

<sup>8</sup> Cree Services 公司为 LED 灯具提供一套全面的热学、电学、机械、光度和光学测试 (TEMPO)。TEMPO 21 和 TEMPO 24 都包括焊接空洞测试。  
[www.cree.com/led-components-and-modules/cree-services](http://www.cree.com/led-components-and-modules/cree-services)

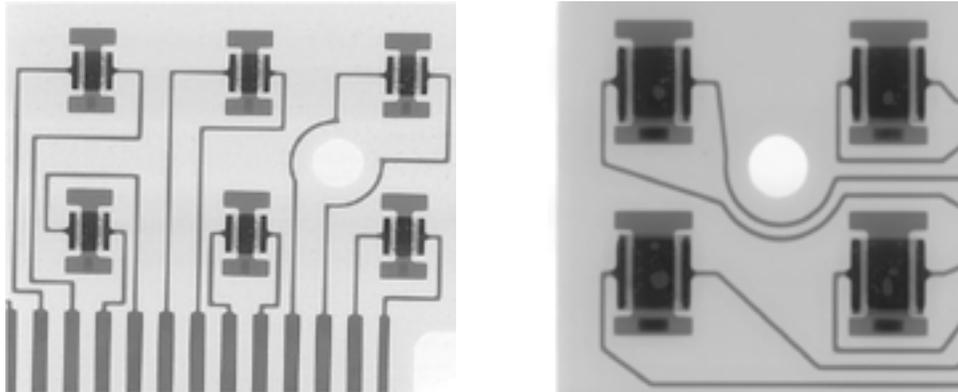
<sup>9</sup> Cree XLamp 拾放应用说明, CLD-AP105, [www.cree.com/xlamp\\_app\\_notes/pick\\_place](http://www.cree.com/xlamp_app_notes/pick_place)  
Cree XLamp LED 的热管理, CLD-AP05, [www.cree.com/xlamp\\_app\\_notes/thermal\\_management](http://www.cree.com/xlamp_app_notes/thermal_management)  
焊接和处理详细信息可参阅每款 XLamp LED 相应的焊接和处理文档。

<sup>10</sup> YXLON International, [www.yxlon.com/Products/X-ray-systems/Y-Cougar](http://www.yxlon.com/Products/X-ray-systems/Y-Cougar)

Cree 认为，焊接空洞少于 30%（即焊料的无效焊区少于 30%）为理想状态。Cree 还认为，焊接空洞大于 50% 容易导致焊点失效。本研究中，Cree 选择分析焊接空洞小于 30% 和大于 50% 时的焊点可靠性。

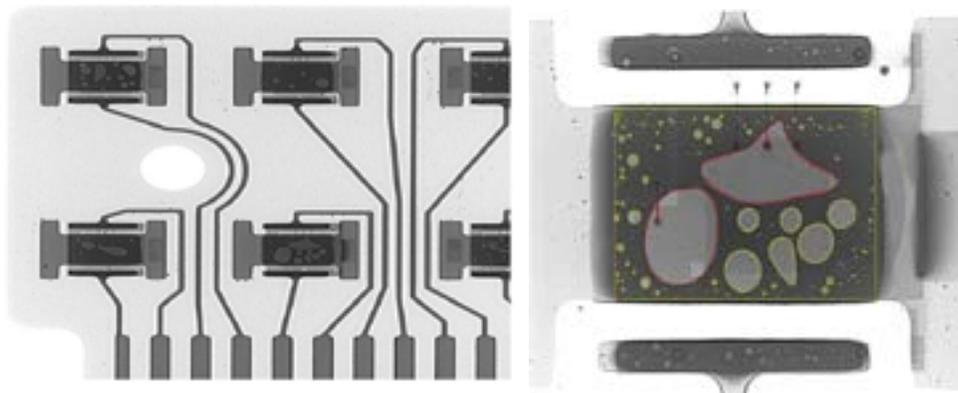
我们发现，XB-D、XP-G 和 XM-L HVW LED 封装的空洞范围在 5% 至 30% 之间；其他 LED 封装的空洞大于 50%。所有器件中都没有观察到阴极/阳极触点与散热盘之间存在多余焊料的迹象。空洞会影响热性能和电气完整性，进而导致元件与 PCB 之间热阻增加，因此，LED 封装与 MCPCB 之间存在过多焊接空洞是一个关乎可靠性的问题。

图 8 显示了 XP-G 和 XM-L HVW LED 封装在焊接空洞小于 30% 时的 X 射线成像。



**图 8: PCB上XP-G LED 封装（左）和 XM-L HVW LED 封装（右）在焊接空洞 < 30% 时的 X 射线成像**

我们有意减小了 XM-L 焊料模板设计尺寸，以减少 LED 封装下方的焊料覆盖面积。从图 9 可以看出，焊料覆盖面积减少会使 LED 下方因缺少焊料而出现大量空洞。焊料覆盖面积减少导致 LED 封装下方因缺少起到润湿作用的焊料而出现大量空洞。



**图 9: PCB上XM-L LED 封装在出现大量空洞 (> 50%) 时的 X 射线成像**

## 热冲击测试

热冲击测试是疲劳寿命测试中发展速度最快的一种形式，是温度变化速率很高的一种温度循环类型 [10]。该测试是通过在指定时段内在高温（如125 °C）和低温（如 -40 °C）两个“腔室”交替输送所测试产品来实现的。热冲击测试期间，焊点会经历高低极端温度之间 165 °C 的温度差。温度迅速变化的过程中，组装板不同部件之间会出现较大的膨胀系数差异。不仅膨胀系数差异会导致产生此引力，更重要的是，不同部件之间的温度差也会导致产生此应力。大面积不均匀膨胀导致焊点出现较大的塑性变形，而且其程度远远大于现实应用中可能出现的变形，原因是现实应用中温度变化较为缓慢。<sup>11</sup> 因此，冲击测试会明显加快失效机理的演变过程，从而能够在较短的时间内诱发潜在失效状况 [10]。

### 热冲击测试数据表

基于 MIL-STD-202G-Method 107G 对 120 个 XLamp LED 封装（四款 XLamp LED 产品，每款 30 个样品）进行热冲击测试。在这个测试中，每个焊点都会在 -40 °C 到 125 °C 温度范围内承受 2000 次（而非 200 次）热冲击。<sup>12</sup> 热冲击测试的升温速度约为 1.1 °C/秒。表 1 为热冲击测试数据表。

测试	适用的标准	测试条件和失效判定标准
热冲击	MIL-STD-202G- 方法 107G	温度范围: -40 °C 到 125 °C
		保持时间: 15 分钟
		传热时间: < 20 秒
		周期: 1000 个周期
		失效判定标准: 测试后 LED 不再亮起来

表 4: 热冲击测试数据表

## 热冲击测试结果

每完成 100 次热冲击测试后监测每块板上各个 LED 的多个不同光学参数（光通量、色度坐标，色移）和电气参数（正向电压、电流、泄露电流）。由于“不发光”也被指定为热冲击测试失败的判定标准，因此还明确了照明设备不再亮起时所处的周期。表 5 显示了监测结果。

<sup>11</sup> 塑性变形是指应力作用下材料的不可逆、非弹性变形。发生塑性变形的材料最终将断裂并失效。

<sup>12</sup> 据认为，200 次热冲击测试是可接受用于衡量 LED 焊点长期可靠性的典型方法。

LED	LED 尺寸	被测LED数量	空洞	热冲击测试失效	累积失效次数
XB-D	2.45 mm X 2.45 mm	30	空洞: < 30%	2000 个周期后 0 次	0
XP-G	3.45 mm X 3.45 mm	30	空洞: < 30%	1800 个周期时 1 次 2000 个周期时 1 次	2
XM-L HVW	5.0 mm X 5.0 mm	30	空洞: < 30%	1200 个周期时 1 次 1350 个周期时 1 次 1850 个周期时 1 次 2000 个周期时 1 次	4
XM-L	5.0 mm X 5.0 mm	30	空洞: > 50%	600 个周期时 1 次 700 个周期时 1 次 800 个周期时 1 次 1000 个周期时 1 次 1100 个周期时 1 次 1200 个周期时 1 次 1350 个周期时 1 次 1675 个周期时 1 次 1850 个周期时 1 次 2000 个周期时 1 次	10
MC-E	7.0 mm X 9.0 mm	20	空洞: < 30%	1000 个周期时 0 次	0
XR-E	7.0 mm X 9.0 mm	20	空洞: < 30%	800 个周期时 1 次 1000 个周期时 4 次 1400 个周期时 3 次	8
MT-G	9.0 mm X 9.0 mm	30	空洞: < 30%	400 个周期时 14 次 600 个周期时 12 次 700 个周期时 1 次	27

**表 5: 热冲击测试后失效状况概要**

通常情况下，通过 200 次热冲击测试即视为 LED 焊点长期可靠性达到可接受标准。然而，并没有明确方法可以将通过 200 次热冲击测试与正常工作条件下焊点的预计寿命直接相关联。严格而言，热冲击测试值是允许直接比较不同尺寸的 LED 封装和材料的失效次数。在这些测试中，除 MT-G 外的所有 LED 都要承受至少 1000 次（正常次数的五倍）典型的热冲击测试。我们观察到，MT-G LED 的失效次数导致测试在达到 1000 个周期前停止。

热冲击测试结果表明，LED 封装的尺寸与第一次失效时的周期数量呈线性相关性。。

### 采用威布尔分析解读热冲击失效数据

焊点疲劳寿命预测模型有很多种。这些模型基于一个或多个可能导致焊点损坏的基本机理。这些基本机理包括基于塑性应变 (Coffin-Manson、Solomon、Engelmaier 和 Miner 疲劳模型)、基于蠕变应变 (Syed 模型)、基于能源 (Darveaux 疲劳模型) 以及基于损伤积累的机理 [11]。

热冲击数据使用威布尔分布进行分析。本研究中，使用威布尔概率图对 XLamp LED 封装的失效数据建模。二参数威布尔分布通过形状和尺度参数定义。威布尔累积失效分布用于拟合失效数据所对应的周期次数。

计算公式为：

$$F(N) = 1 - \exp(-N/N_0)^m$$

其中，F(N) 是累积失效分布函数，N 是热循环次数。

$N_0$  是被称为特征寿命的尺度参数，即失效发生率为 63.2% 时的循环次数。形状参数  $m$  表示威布尔曲线的形状； $m$  增加时，循环中的失效次数减少。二和四之间的形状值视为稍微正常。形状值小于二形成右倾曲线，形状值大于四形成左倾曲线。

研究中使用 Minitab 统计软件对失效次数数据进行威布尔分析。<sup>13</sup> 图 11 至图 133 显示了四款 LED 出现失效状况的威布尔概率图。

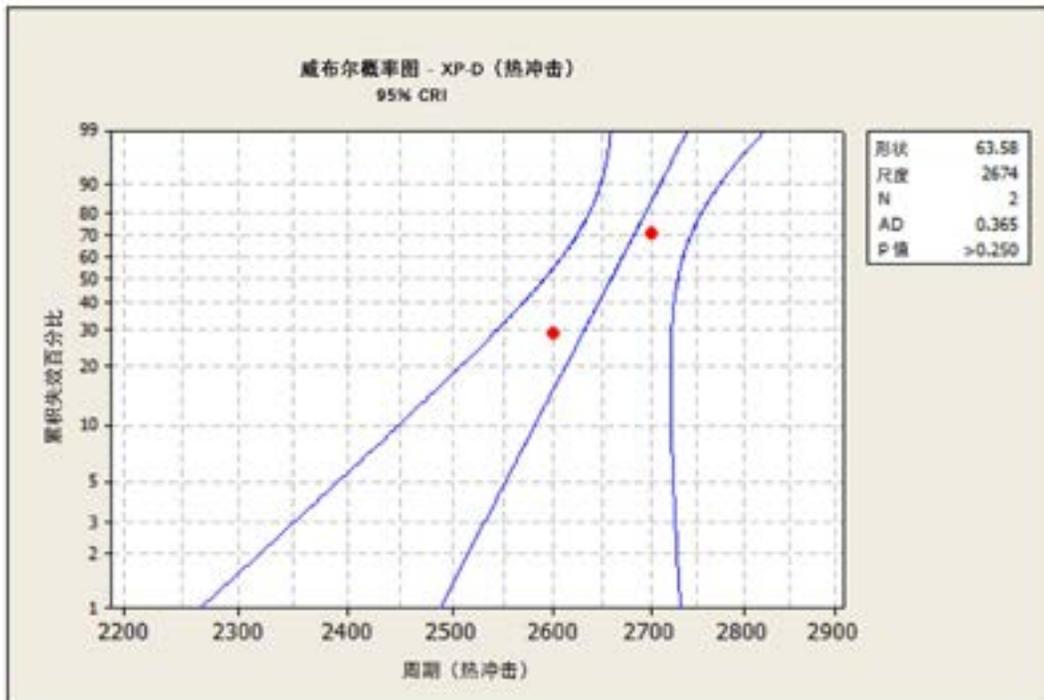


图 10: XP-D 热冲击测试, -40 °C 到 125 °C, 最多 2700 个周期

<sup>13</sup> Minitab, Inc., [www.minitab.com/en-US/products/minitab/default.aspx?WT.srch=1&WT.mc\\_id=SE003568](http://www.minitab.com/en-US/products/minitab/default.aspx?WT.srch=1&WT.mc_id=SE003568)

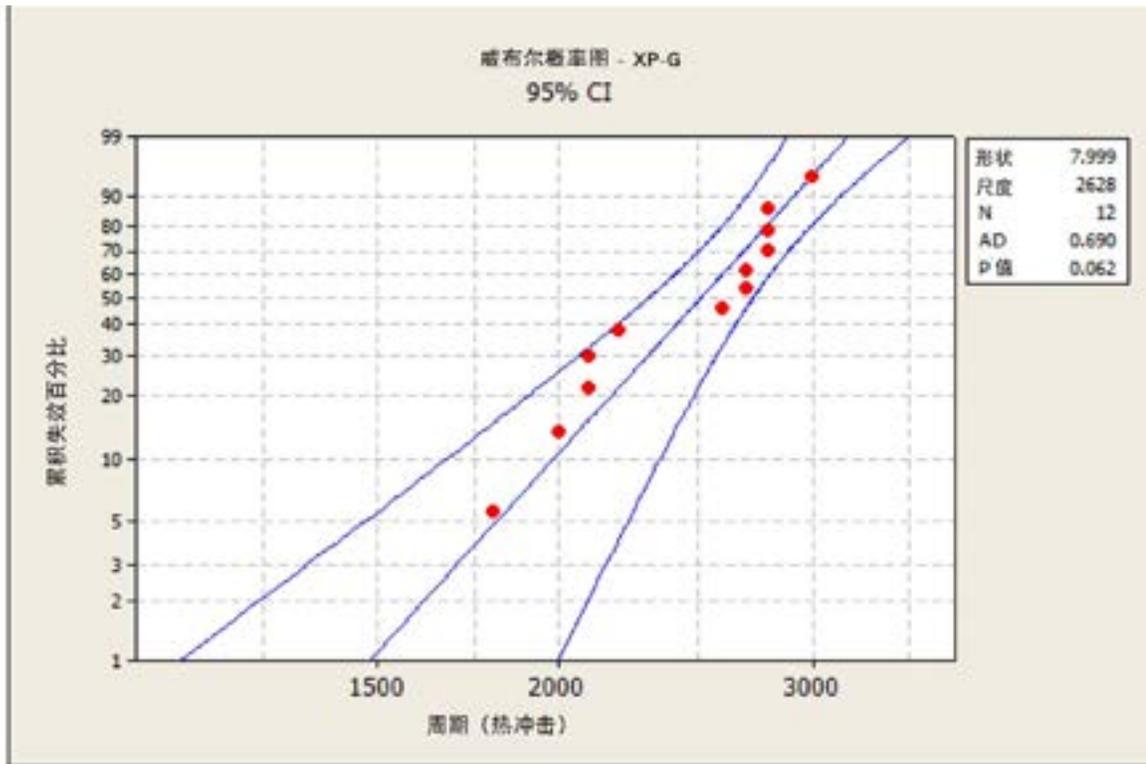


图 11: XP-G 热冲击测试, -40 °C 到 125 °C, 最多 3000 个周期

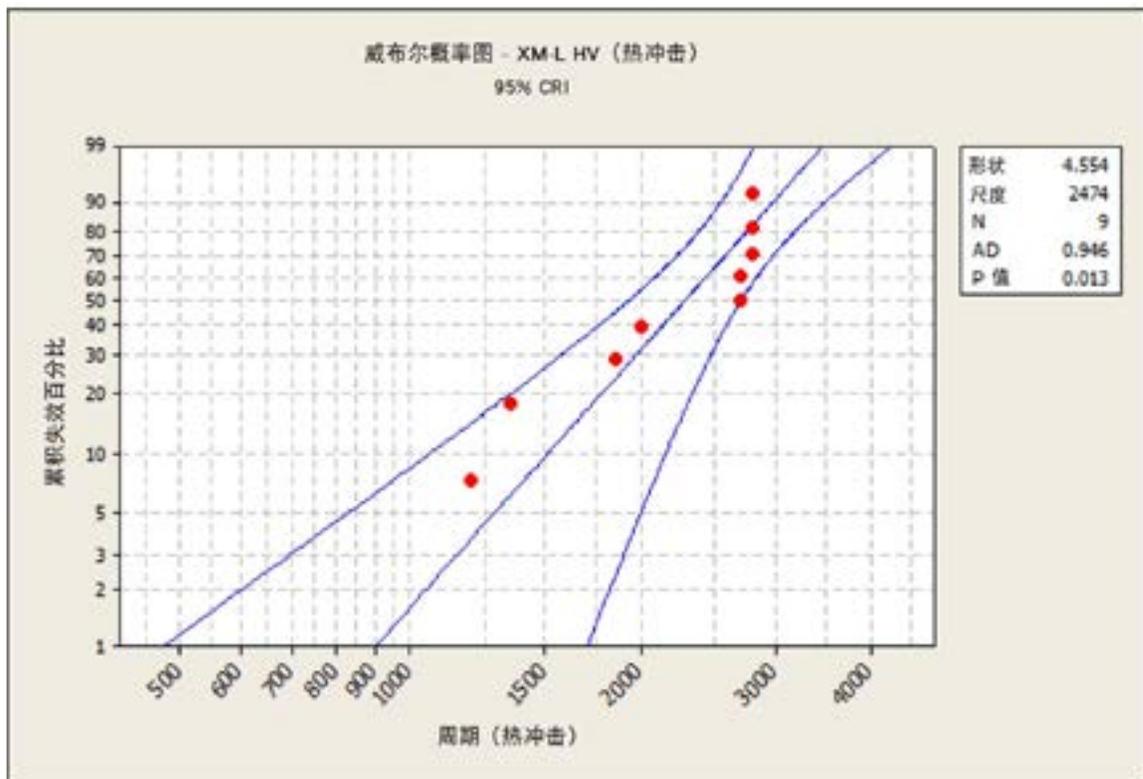
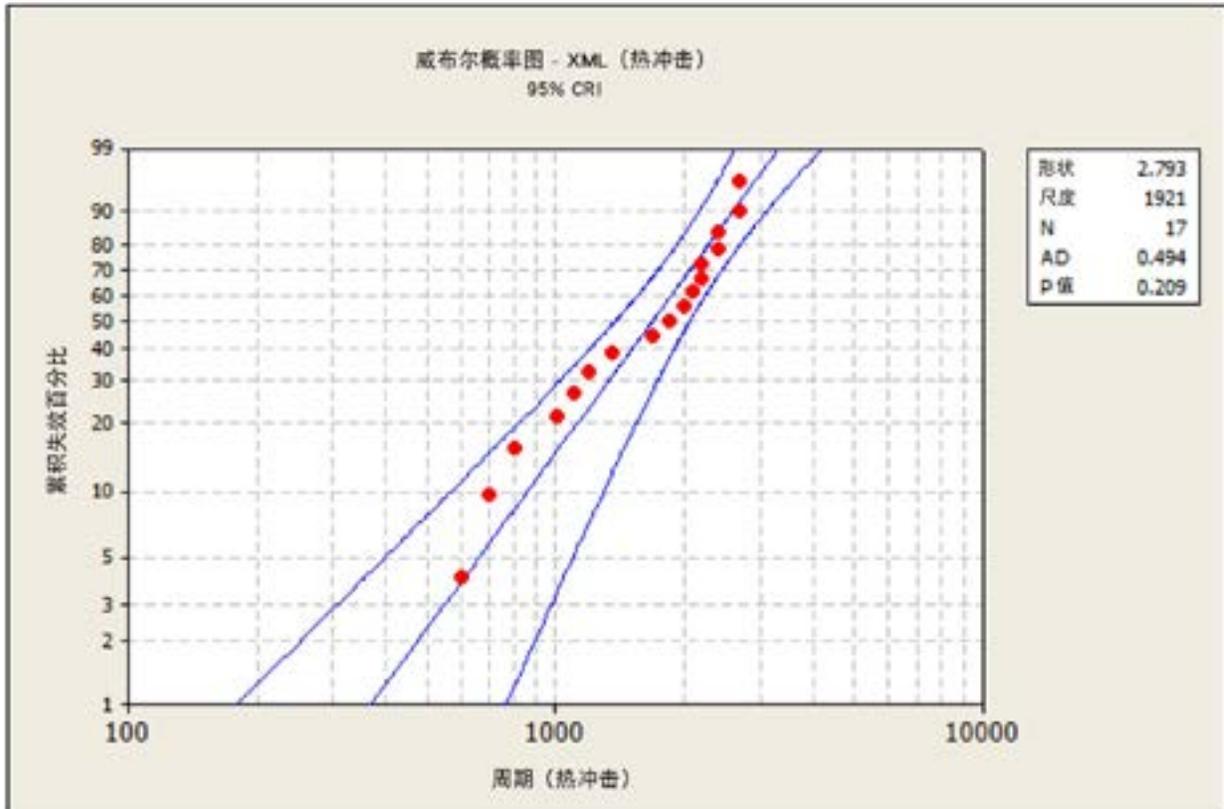


图 12: XM-L HVW 热冲击测试, -40 °C 到 125 °C, 最多 2800 个周期



**图 13: XM-L 热冲击测试, -40 °C 到 125 °C, 最多 2700 个周期**

威布尔概率图显示, 空洞小于 30% 的较小 LED 封装下的焊点其表现优于空洞小于 30% 的较大 LED 封装下的焊点。相反, 空洞百分比升高至大于 50% 会导致焊点性能差。此外, 焊点的特征寿命还表现出对空洞程度很强的依赖性, 空洞百分比越小, 特征寿命越长。

### 热冲击引发的失效模式

众所周知, 热管理是决定高功率 LED 封装长期可靠性的最重要因素之一。大多数电子故障都与热机械有关, 即由较高温度下的热诱发应力和应变或加速传输现象所致。这些热机械故障归类为外在故障, 因为它们通常与电子封装有关 [8]。

在非工作寿命测试 (如热冲击测试) 中, 温度骤变会导致焊点同时退化, 从而导致金属间化合物 (IMC) 增长和热疲劳损伤。热疲劳失效是与无铅焊点相关的最常见的失效模式之一, 通常是由材料的热膨胀系数 (CTE) 差异所致。这些热膨胀系数差异是在材料界面产生应力和机械应变的原因所在, 会导致焊点中产生疲劳裂纹并不断扩展。热膨胀系数是一个关键的材料属性, 可以用于量化材料由于温度变化膨胀或收缩的程度 [8]。

在本研究中, 我们还使用扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散X射线 (EDX) 分析和光学显微镜检查了焊点接口, 以评估焊点的完整性和可能出现的疲劳失效模式。

失效焊点的横截面显示元件侧面焊料主体中存在裂纹。这些样品呈现了无铅焊料合金中热机械疲劳失效的典型微观结构。

## 焊点评估

---

### 焊点微观结构

本研究中通过执行横截面分析，来分析焊点在热冲击测试后的表现，如图 14 至图 17 所示。失效焊点的横截面显示，在四款 LED 封装中，疲劳断裂都是从焊料边缘开始。大部分疲劳裂纹都存在于焊料迹线主体内部的锡和银颗粒之间，并沿最高应变方向扩展到整个焊料长度 [9]。

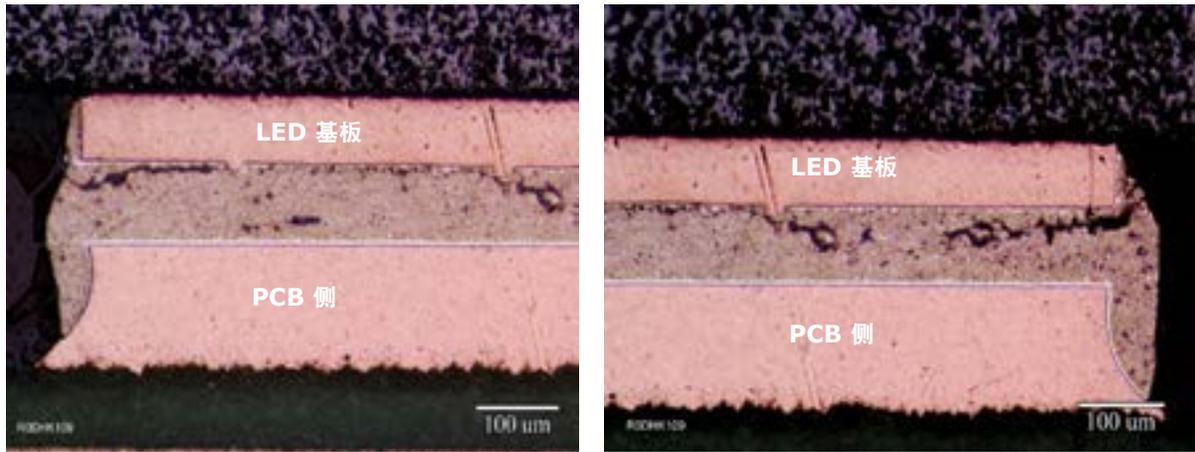


图 14: 热冲击测试后 PCB 与 XLamp XB-D LED 封装间的焊点

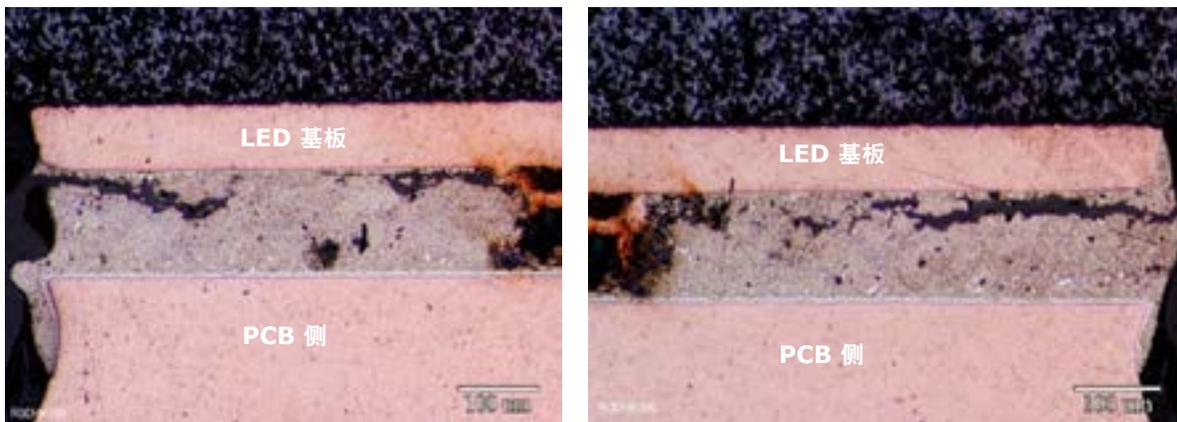


图 15: 热冲击测试后 PCB 与 XLamp XP-G LED 封装间的焊点

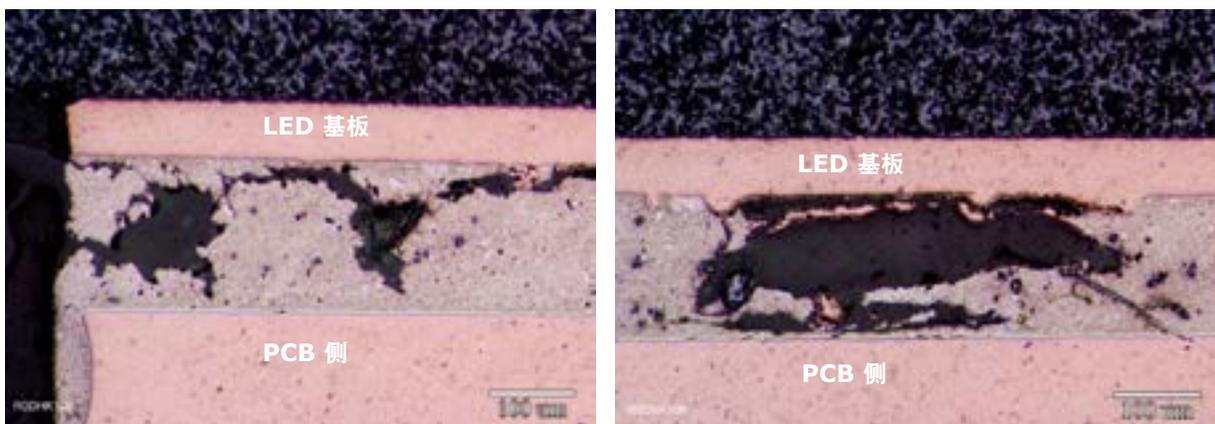
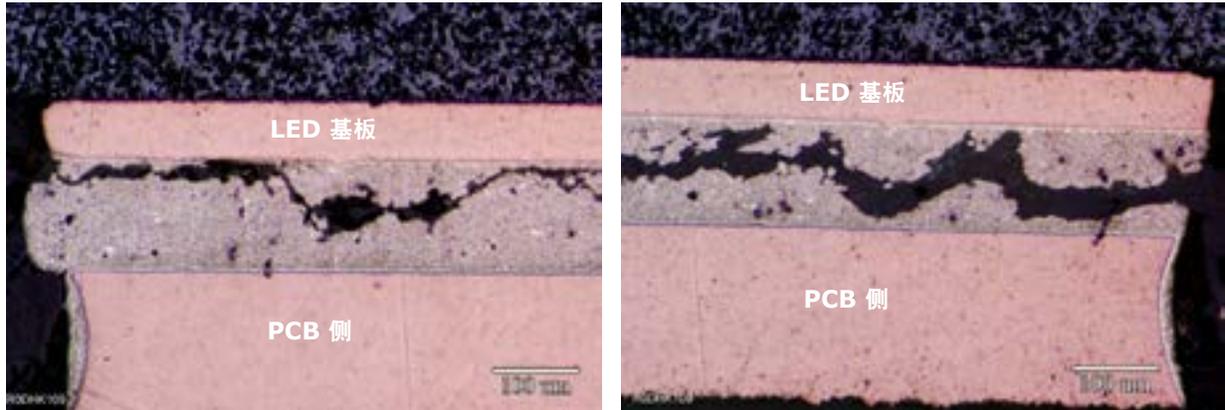


图 16: 热冲击测试后 PCB 与 XLamp XM-L LED 封装间的焊点回流焊后, XM-L LED 封装下方的空洞超过 50%。



**图 17: 热冲击测试后 PCB 与 XLamp XM-L HVW LED 封装间的焊点**

横截面研究表明，存在焊料裂纹且一直延伸到焊点边缘，焊点边缘是最大应力集中的位置。这些裂纹发生于焊料主体内部区域，从焊点的一个边缘一直延伸至另一边缘，不仅会降低电气性能，而且还可能导致焊点出现机械故障。XB-D LED 是本研究中尺寸最小的 LED，XM-L HVW 的基板是 XB-D 表面积的四倍多，两款 LED 的空洞都小于 30%，但研究显示，XB-D LED 封装下方的焊点裂纹却没有 XM-L HVW 那么严重。观察到的裂纹都是典型的焊点疲劳断裂，通常与对偶/联结材料之间热膨胀系数差异所诱发的热冲击应力相关。

基于以上观察，我们的结论是：LED 封装尺寸对焊点裂纹的产生具有很大影响。XM-L HVW 和 XB-D 两款 LED 的空洞都小于 30%，但研究显示，与本研究中最小的 LED 封装 XB-D 相比，XM-L HVW 下方的焊点失效最多。

较大 LED 封装下方的焊点裂纹呈连续状态，从焊料的一个边缘一直延伸至另一边缘，无间断。横截面图像显示了元件侧和 PCB 侧的裂纹外观。不过，元件侧的裂纹扩展程度更为严重。

图 18 所示为 XB-D LED 封装的横截面 SEM 显微图，图中显示了热冲击测试后的焊点裂纹。在图像中，可以观察到走向元件侧的焊点裂纹。

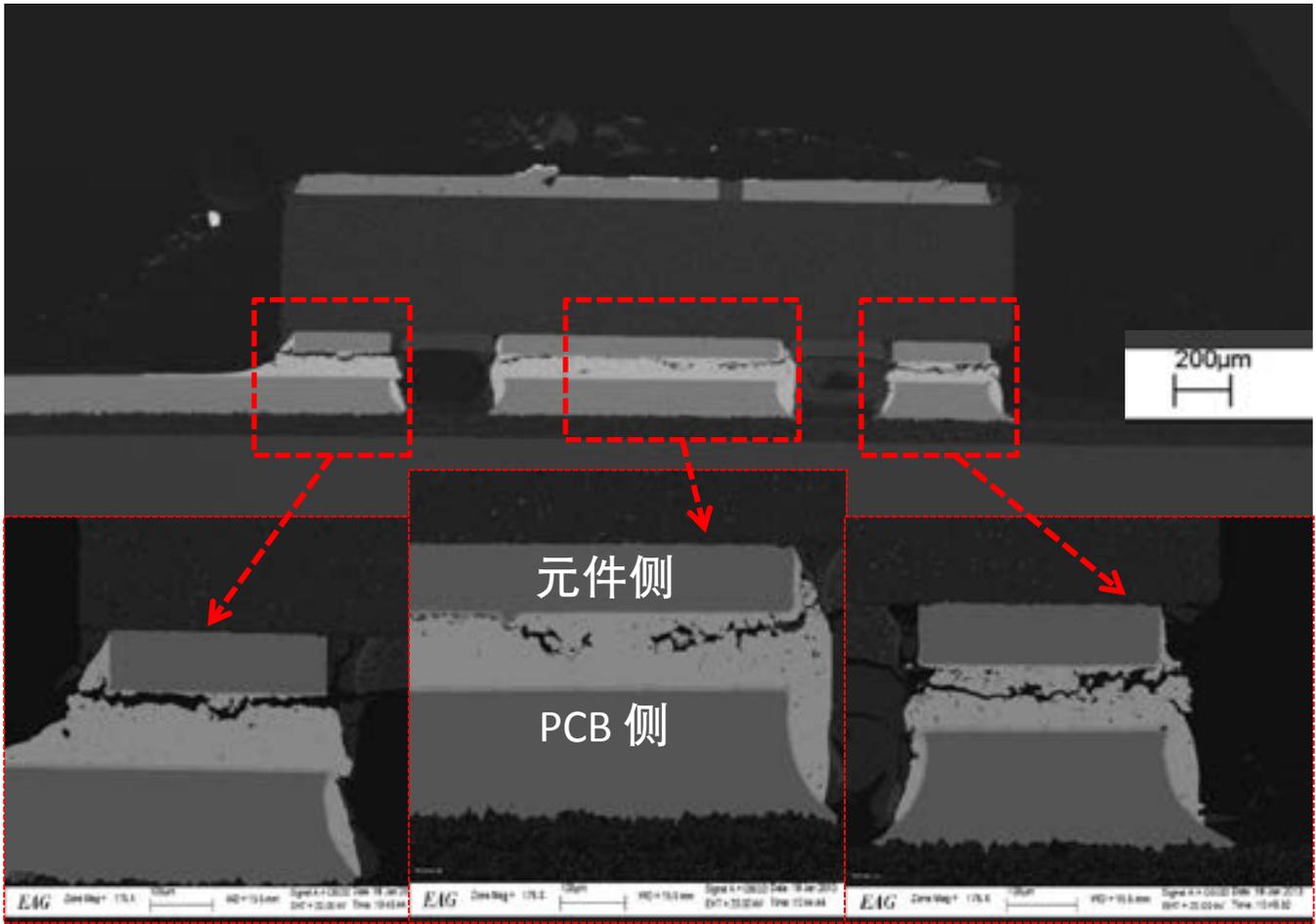


图 18: 显示热冲击测试后焊点裂纹的 XB-D LED 封装横截面 SEM 显微图

图 19 所示为 XM-L HVW LED 封装的横截面 SEM 显微图，图中显示了热冲击测试后的焊点裂纹在元件侧更为普遍。

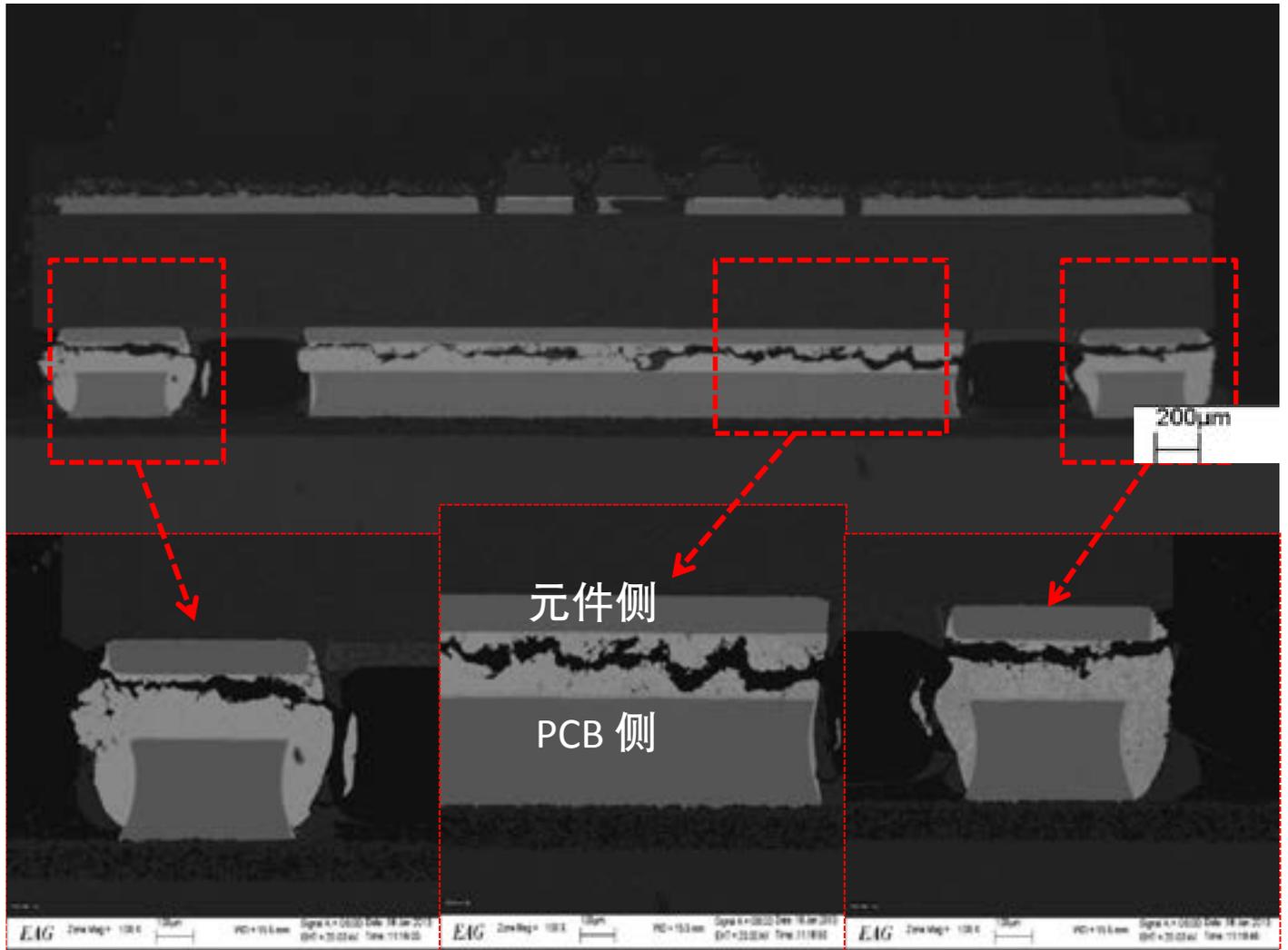
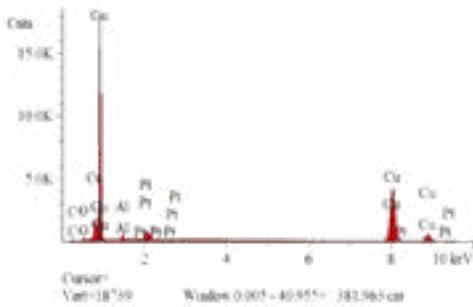
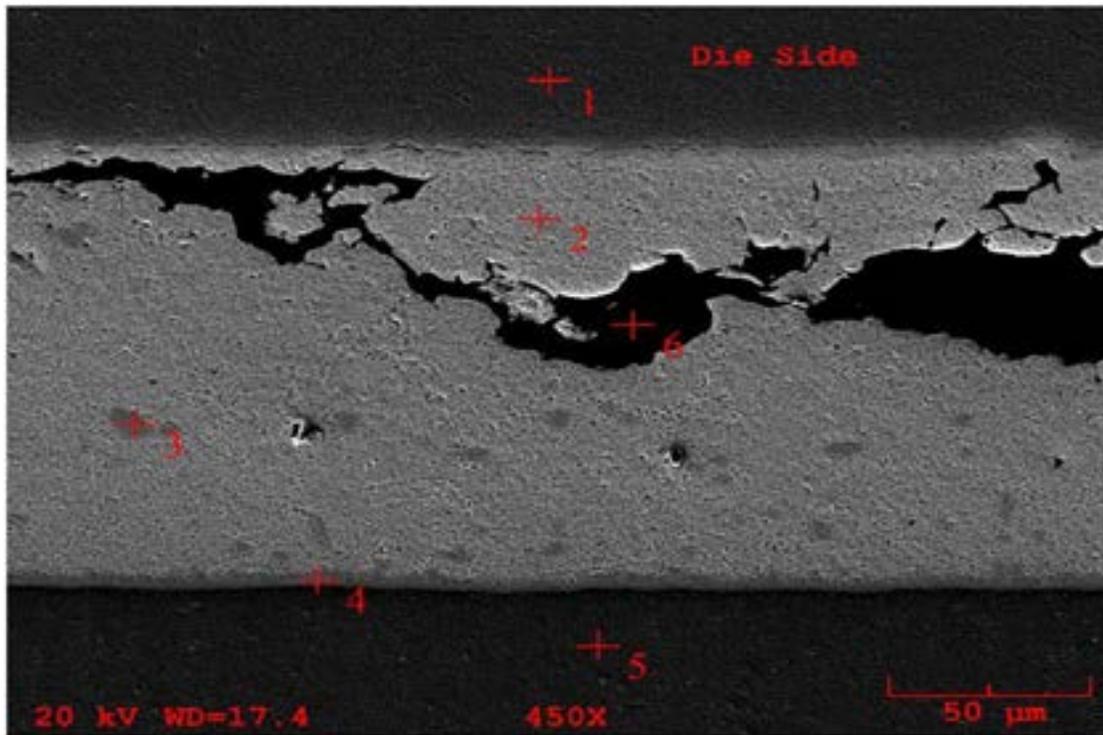
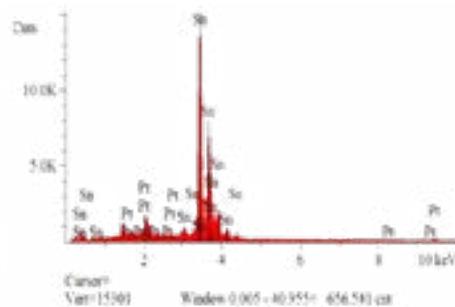


图 19: 显示热冲击测试后焊点裂纹的 XM-L HVW LED 封装横截面 SEM 显微图

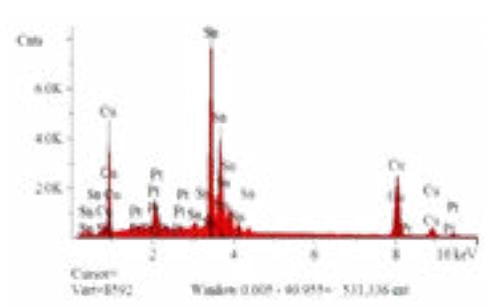
XM-L HVW 焊点的 EDX 分析表明存在银锡 ( $Ag_3Sn$ ) 和铜锡 ( $Cu_6Sn_5$ ) 两种金属间相 [7]。这些金属间化合物脆性，焊点失效将发生在这些区域。



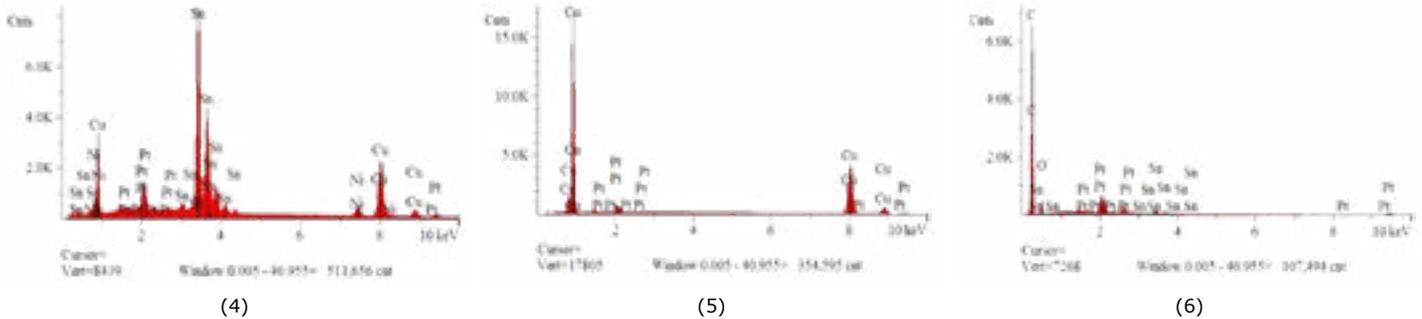
(1)



(2)



(3)


**图 20: XM-L HVW 焊点 (顶部) 与 EDX 分析位置**

### 结语

本研究通过 -40 °C 至 +125 °C 的热冲击测试分析了各种尺寸 XLamp LED 封装与 PCB 之间无铅焊点的可靠性。焊点微观结构的 SEM 分析表明，焊点主体内部走向 LED 元件侧的裂纹是由焊点疲劳失效所致。EDX 分析展示了各种银锡和铜锡金属间相的形成。这些脆性金属间化合物可能会削弱焊点的强度，具体取决于特定的工作条件。热疲劳失效模式与无铅焊点相关，是由材料的热膨胀系数差异所致。这些热膨胀系数差异是在材料界面产生应力和机械应变的原因所在，会导致焊点中产生疲劳裂纹并不断扩展。

以上评估所使用的方法遵循 JEDEC 规范 (JESD22-A104D)、测试条件G (-40 °C 至 +125 °C)、浸泡模式 4 (15 分钟)。测试结果表明，焊点可靠性很大程度上取决于 LED 的封装尺寸和焊接空洞百分比。焊接空洞越多，可靠性越低；基板尺寸越大，可靠性明显降低。需要注意的是，虽然本次研究允许对不同的产品类型、工艺或材料进行直接比较，但此 JEDEC 方法不允许用户将此分析结果类推至“现实”条件，因为现实条件下的极端温度和冷却/加热速度要弱得多。

最后，为避免焊点过早失效，Cree 建议始终对 XLamp LED 使用推荐的焊盘布局、焊膏和回流焊温度曲线，具体信息可在 Cree 的相关焊接和处理文档中找到。

### 参考文献

1. Ellen Tormey, Rahul Raut, Westin Bent, Ranjit Pandher, Bawa Singh and Ravi Bhatkal, "Low Voiding Reliable Solder Interconnects for LED Packages on Metal Core PCBs", [alphacpmd.com/~media/Files/CooksonElectronics/ETormey%20et%20al%20SMTAI%202011%20Final%2008082011.pdf](http://alphacpmd.com/~media/Files/CooksonElectronics/ETormey%20et%20al%20SMTAI%202011%20Final%2008082011.pdf)
2. Robert W. Herrick, *FA Handbook*, Chapter 5, Special Devices, Failure Analysis and Reliability of Opto Electronic Devices, pp 248-250
3. "Solder Joint Reliability", [www.rohmhaas.com/electronicmaterials/interconnect\\_technical\\_site/attachments/Tech%20comm\\_%20Jul%2008%20English.pdf](http://www.rohmhaas.com/electronicmaterials/interconnect_technical_site/attachments/Tech%20comm_%20Jul%2008%20English.pdf)
4. J.Pan, J. Wang and D.M.Shaddock, *Lead-free Solder Joint Reliability - State of the Art and Perspectives*, International Microelectronics and Packaging Society-JMEP, Vol.2, No.1, 1st Qtr, 2005
5. P.Biocca, "Lead-free Defects in Reflow Soldering", [www.smta.org/chapters/files/smta-gdl\\_Lead\\_free\\_Reflow\\_Defects\\_\\_How\\_to\\_Prevent\\_Them.pdf](http://www.smta.org/chapters/files/smta-gdl_Lead_free_Reflow_Defects__How_to_Prevent_Them.pdf)
6. L.P Lehman, R.K.Kinyanjui, L. Zavalij, A. Zribi, and E.J.Cotts, *Growth and Selection of Intermetallic Species in Sn-Ag-Cu No-Pb Solder Systems Based on Pad Metallurgies and Thermal Histories*, IEEE 2003 Electronic Components and Technology Conference, pp 1215-1221.
7. Janick Ihringer, "Reliability of LEDs and LED Based Luminaires for Outdoor Applications", LED Symposium Expo.

9. Peter Ratchev, Bart Vandavelde and Ingrid de Wolf, *Reliability and Failure Analysis of Sn-Ag-Cu Solder Interconnections of PSGA packages on Ni/Au Surface Finish*
10. R.J. Klein Wassink, *Soldering in Electronics, Second Edition, A Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-Hole Techniques*, Electrochemical Publications Limited, 1989.
11. W. D. van Driel, X.J.Fan (Ed), *Solid State Lighting Reliability, Components to Systems*, Solid State Lighting Technology and Application Series
12. Mohammad Yonus, K.Srihari, J.M.Pitarresi, Anthony Primavera, *Effect of Voids on the Reliability of BGA/CSP Solder Joints*, *Microelectronics Reliability* 43(2003) p 2077-2086.
13. David Bernard and Keith Bryant, "Does PCB Pad Finish Affect Voiding Levels in Lead-free assemblies?", [www.nordson.com/en-us/divisions/dage/support/Literature/Documents/Pad\\_finish.pdf](http://www.nordson.com/en-us/divisions/dage/support/Literature/Documents/Pad_finish.pdf)