

# 功率循环中表面安装器件(SMD) 热变形的实时全息干涉测量研究

王卫宁

(首都师范大学物理系 北京 100037)

梁镜明

(香港城市大学物理及材料科学系)

**摘要** 功率循环中表面安装器件(SMD)的热应变是影响 SMD 焊点可靠性的重要因素之一。本文采用实时全息干涉度量法对一个具有 100 条引线的塑料四边引线封装器件(PQFP)在功率循环中的热-力耦合离面变形场进行了测量,获得了分别位于 PQFP 和印制电路板(PCB)表面的离面变形数值,并根据两者之间的离变形失配,精确地计算出了引线和焊点的变形,为全面了解 SMD 在功率循环条件下的热力学行为及分析 SMD 焊点的疲劳失效机理提供了精确可靠的实验数据

EEACC: 0170J, 2210, 0170E, 0590

## 1 引言

在表面安装技术(SMT)中,器件焊点既起电联接作用,又起机械联接作用。它在热循环中的可靠性问题是人们普遍关注的焦点问题之一。在热循环中,由于 SMD 和 PCB 之间的热膨胀失配,使焊点产生热应力而导致的疲劳失效,是 SMT 可靠性研究中的一个很重要的问题。SMD 及 PCB 材料的热膨胀系数(CTE)不同而引起的两者间剪切应变失配,是温度循环中焊点失效的主要原因。在特殊使用条件下,如航空航天等领域,由于 SMD 封装采用陶瓷材料,它与基板 CTE 之间存在的较大差异,使焊点的可靠性问题更为突出。然而,在一般使用条件下,Engelmaier 指出,功率循环(电器开关及一段时间运行)引起焊点的疲劳失效问题也不可忽略<sup>[1]</sup>。

在功率循环中,由于器件消耗电功率,会产生两个重要现象:一是器件既沿 PCB 厚度

方向,又沿 PCB 径向产生温度梯度;二是在电源开关瞬时,器件和 PCB 升降温速率并不同,这些会使器件和 PCB 不可避免地产生热变形失配,导致焊点内部的热应力。目前,有关 SMD 在功率循环中的变形行为及对功率和时间响应的全面定量分析尚不多见。

实验研究 SMD 及其焊点的应力、应变是进行 SMD 可靠性分析的重要手段。光弹模型法<sup>[2]</sup>、电阻应变片法<sup>[3]</sup>、几何云纹法<sup>[4]</sup>都曾采用。然而,上述测试技术存在以下一些缺陷:模型法对实际器件的材料特性需做简化与近似;电阻片法每次只能测得应变片所覆盖区域内的平均应变值,观察不到应变的分布及整个器件的变形,且所测数据具有一定的离散性;几何云纹法的测量精度一般较低。

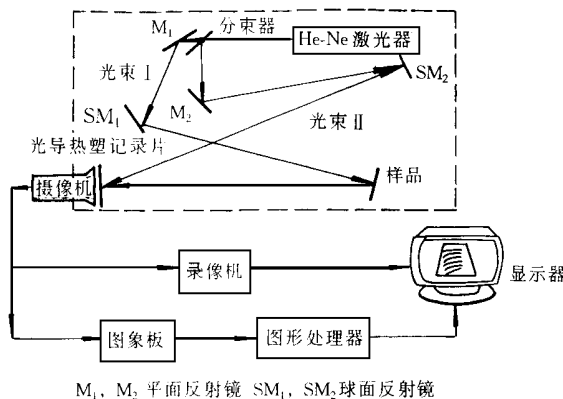
全息干涉度量方法具有高灵敏度、高精度、非接触性、全场分析等优点,可直接获取离面位移。Hall<sup>[3]</sup>首先将全息干涉技术引入 SMT 的可靠性研究中。他们采用二次曝光技术测量了 LCCC-PCB 在功率循环热稳态状态下 PCB 板的离面变形场,发现了在功率循环中 PCB 的周期性翘曲变形,并由此推算出了焊点的拉伸或压缩变形。由于 Hall 等人忽略了器件的变形行为,其所得结果不够精确。

本文采用实时全息干涉度量技术,对一个焊接在 PCB 上具有 100 条引线的塑料四边扁平封装(100pin PQFP)的样品在功率循环中离面变形行为进行了研究。与二次曝光技术相比,实时全息干涉技术可获得反映器件和 PCB 变形的干涉条纹场的形成、变化至稳态的全部过程。通过实时观测,可区分和判读分别位于 PQFP 和 PCB 表面上的干涉条纹的级序,并由此获取引线及焊点的变形。

## 2 实验测试系统及对 SMD 离面变形量的处理方法

### 2.1 实验测试系统

用于本次研究的实时全息干涉仪(Real-time Holographic Interferometry (RTHI))系统如图 1 所示。图中虚线框内是一个典型的离轴全息干涉光路。光源为 He-Ne 激光光源,由激光器发出的光经分束器 BS 分成两束,分别为照射物光 I 和参考光束 II。RTHI 系统的核心部分是美国 Newport 公司生产的 HC-300 光导热塑记录系统。它可将物体的全息图记录在一个光导热塑介质版上,以全自动电控方式,原位、快速地完成全息照相的“曝光、显影、定影、清洗”的处理过程,克服了以往传统银乳胶干版化学清洗的冗长费时、精确复位的困难和由此带来的一些误差。



M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 平面反射镜 SM<sub>1</sub>、SM<sub>2</sub> 球面反射镜

图 1 实时全息干涉仪系统

“曝光、显影、定影、清洗”的处理过程,克服了以往传统银乳胶干版化学清洗的冗长费时、精确复位的困难和由此带来的一些误差。

### 2.2 全息干涉条纹与离面位移的关系

根据全息干涉的基本原理,在一个散射体表面,通过实时或双曝光所给出的干涉条纹与表面变形的关系,可以用单位变形矢量来表示:

$$n\lambda = K \cdot d \tag{1}$$

式中  $n$  是干涉条纹级数;  $\lambda$  为相干光波长;  $d$  为表面观测点的变形矢量  $K = i_2 -$

$i_1$ , 为灵敏度矢量, 其中  $i_1$  和  $i_2$  分别为入射光方向和观察方向的单位变形矢量, 其夹角为  $2\alpha$  (图 2). 当被测平面的法线方向位于该角的平分线上时, 则式(1)中的  $d$  便是被测物体表面的离面变形量, 可表示为:

$$n\lambda = d \cos\alpha \tag{2}$$

本实验采用的物光与观察方向(全息记录片所在位置)之间的夹角为  $13.6^\circ$ . 实验中, 使 SMT 样品表面法线位于该角的平分线上, 即,  $\alpha = 6.8^\circ$ . 由实验条件可知, 当  $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$  时, 器件的离面变形量为:

$$D = 0.3185n \tag{3}$$

即每一相邻干涉条纹所代表的形变量是  $0.3185\mu\text{m}$ .

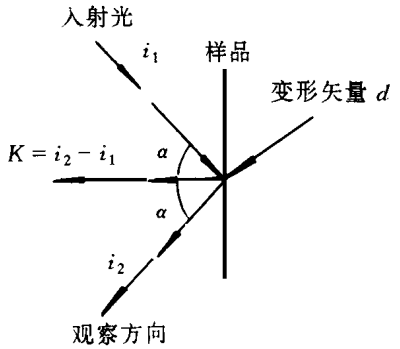


图 2 测量样品的离面变形光路安排

### 2.3 全息干涉条纹级序的判读

在 SMD 和 PCB 的变形测试中, 确定干涉条纹级序是一个十分关键的问题. 根据实验的夹持条件和零级条纹法, 从一张全息干涉条纹图上, 我们仅可以确定位于 PCB 上的全场干涉条纹级序, 但却不能确定位于器件上的干涉条纹级序, 因为两者之间存在变形失配, 所以, 干涉条纹的级次从器件边缘到 PCB 是不连续的. 实验采用实时计数的方法, 记录从功率循环开始到某一时刻从 SMD 表面涌现的干涉条纹数, 从而确定位于器件表面的全场干涉条纹级数.

## 3 测试样品及加载条件

实验样品及几何尺寸如图 3 所示. 一个拥有 100 条引线的 PQFP, 按表面安装工艺被焊接在一块 FR-4 环氧树脂/玻璃单面板的中心位置. 选择 PQFP 的两条引线

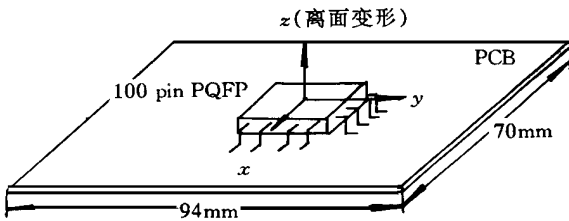


图 3 SMD-PCB 样品示意图

与直流电源相接. 当接通电源时, PQFP 内部 IC 消耗电功率, 器件发生热变形. 实验中将电源开启样品达到升温稳态至电源关闭后组件降温达到稳态(室温)的这段时间(约 20 分钟)作为一个功率循环. 在功率为 1.10W 的功率循环中, 器件各部分的温度随时间变化的曲线如图 4 所示. 由图 4 可知, 在功率循环中, 器件既存在沿

PCB 径向, 又存在沿 PCB 厚度方向的温度梯度.

在全息干涉变形测量中, 将 PCB 沿两个长边弹性夹持, 并将焊有 PQFP 的一面面向光束 I. 实验分别作了五个功率数值为 0.19、0.31、0.55、1.10、2.50W 的功率循环变形场测试.

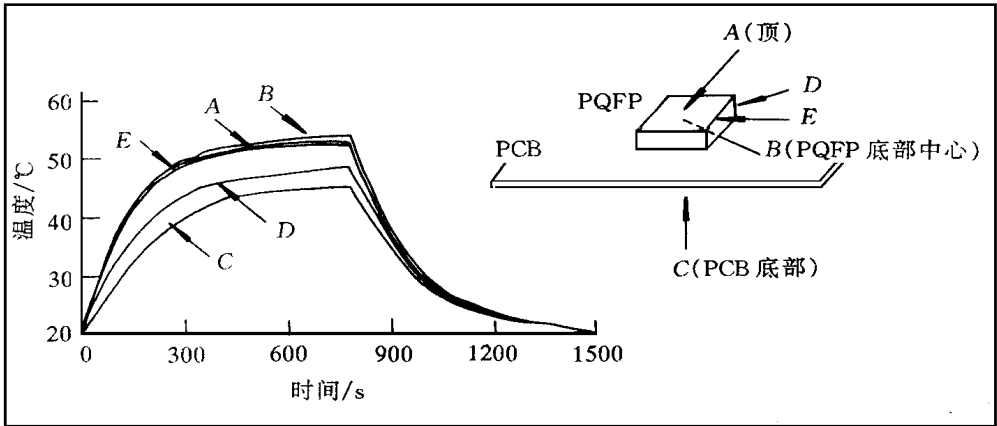


图 4 1.10W 功率循环中样品各部分温度随时间的变化曲线

### 4 实验结果及讨论

#### 4.1 样品的全息干涉条纹场及形变随时间的变化

图 5(见图版 D)为样品在 1.10W 功率循环中的几个不同时刻,包括通电前及通电后 10 秒、1 分钟、2 分钟、10 分钟(温度及形变达到稳态时)的全息干涉条纹图。实时记录的结果表明了功率循环中 PQFP 及 PCB 的干涉条纹场形成过程:在通电的初始时刻,干涉条纹始于器件的中心,亦即热源及最大变形位置;随着温度升高,条纹逐渐增加,直到达到温度稳态。

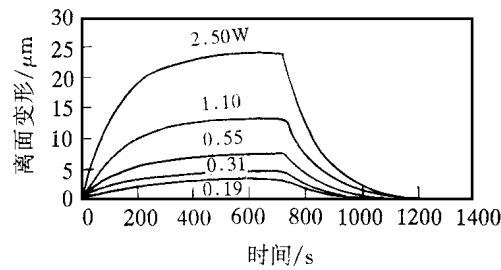


图 6 变形随时间的变化曲线

图 6 所示为在功率取不同数值的循环中,位于 PQFP 表面中心点的面外位移随时间变化的曲线,它与功率循环中器件的温度随时间变化的规律相似。两者之间基本呈线性关系。

#### 4.2 样品的弯曲变形

从干涉图的形状上看,干涉条纹呈圆环形,这表明在功率循环中,PQFP 和 PCB 产生了对称于中心的离面弯曲变形。实时观测及加力位移的实验表明,弯曲方向是由 PCB 指向 PQFP 的方向。

图 7 所示为功耗为 1.10W 的热稳态下,样品表面的全场离面变形图。另外,从图 5(d)所示的干涉条纹的分布来看,在器件的四个角的位置,条纹的密度比较大,是样品的高应变区。

在功率循环中样品内部存在温度梯度是产生弯曲变形的主要原因。

图 8(见图版 D)给出了本实验所采用的最大功率循环中(2.5W, 70 )稳态时的全息干涉图。如图所示,其干涉条纹不仅密集,而且器件表面的条纹形状也十分复杂,变形呈褶皱状。封装器件大而复杂的变形,必然会对其内部的 IC 质量产生影响。另外,实验比较了同一功率条件下 PCB 前后两面的干涉条纹图,发现 PCB 前面板的条纹密度高于背面。这表明了

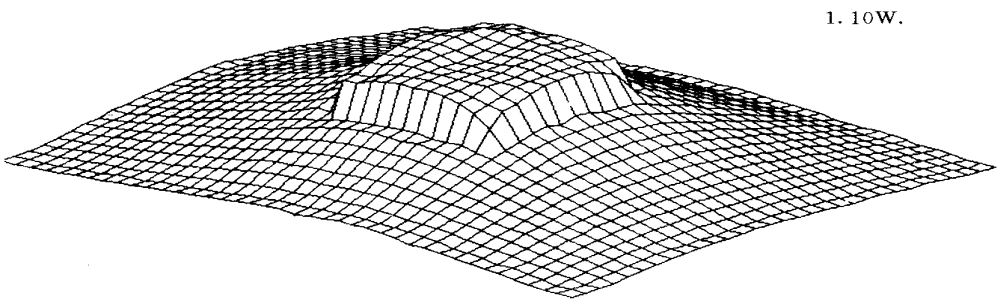


图 7 样品的全场离面变形图

1. 10W.

两面的弯曲变形量是不同的; 由此说明, 仅用 PCB 背面的变形数据(Hall 等, 1983 年)去估计另一面焊点的应力和应变是不甚妥当的

#### 4.3 PQFP 引线(包括焊点)的离面位移

PQFP 及 PCB 之间存在离面变形失配(图 7)表明, PQFP 引线及焊点发生了离面变形。由于 PQFP 和 PCB 的弯曲变形, 使 PQFP 的引线及焊点的变形沿 PQFP 边缘具有一定的对称性, 且引线与 PQFP 固联的首端比焊接在 PCB 的尾端变形大。相对于各边的中点, 在四个角点处, 引线首端的平均拉伸变形为  $1.60\mu\text{m}$ , 是尾端变形的两倍。

## 5 结论

在 SMT 可靠性研究中, 实时全息干涉度量法显示出它的极大的优点。运用该方法检测 PQFP-PCB 样品, 可以二分之一激光波长的精度, 全场实时地给出功率循环中 SMD 的离面变形场, 这为了解 SMD 在功率循环条件下的热力学行为, 分析 SMD 焊点的疲劳失效机理, 提供了精确可靠的边界条件。

对 PQFP-PCB 样品的离面变形测量表明, 在功率循环中, PQFP 与 PCB 均发生了离面弯曲变形, PQFP 与 PCB 材料的热膨胀系数不同及 PQFP 内部芯片消耗功率所产生的温度梯度, 是导致弯曲变形及变形失配的主要原因。在器件四角的位置附近是组件的高应变区。沿 PQFP 边缘, PQFP 与 PCB 之间存在较大的变形失配, 由此导致引线和焊点的离面变形。由于 PQFP 和 PCB 的弯曲变形, 使引线和焊点的变形沿 PQFP 边缘具有一定的对称性, 靠近 PQFP 的四个角点, 变形量较大, 对应于这些部位的焊点, 发生热疲劳失效的可能性最大。

由实验技术获得的引线和焊点的变形数据, 可作为有限元应力应变分析的边界条件, 由此可获得焊点内部的应力应变分布细节。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] W. Engelmaier, IEEE Trans Compon. Hybrids Manuf. Technol., 1983, **CHMT-6**(3): 232~ 237.
- [ 2 ] H. Kotake *et al.*, "Quantitative Measurements of Stress in Silicon by Photoelasticity and Its Application," J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology, Jan. 1980, 179~ 184.
- [ 3 ] P. M. Hall *et al.*, IEEE Transaction Compon. Hybrids Manuf. Technol., 1983, **CHMT-6**(4): 544~ 552.
- [ 4 ] C. P. Yeh, "Experimental and Analytical Investigation of Thermally Induced Warpage for PWBs," Proc. IEEE 41st Electronic Component Technology Conference, Oakland, CA, 1991.
- [ 5 ] W. N. Wang, K. M. Leung, "Reliability Testing of Solder Joints in Surface Mounted Assembly Using Real-time Holographic Interferometry," Proc. of 45th Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, May 1995, 835~ 840.

## Studies of Thermo-Mechanical Behaviour of Surface Mounted Assembly Using Real-Time Holographic Interferometry

Wang Weining

(Dept. of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

Leung King Ming

(Department of Physics and Material Science, City University of Hong Kong)

Received 22 May 1997, revised manuscript received 9 December 1997

**Abstract** This study is directed toward an investigation of thermo-mechanical behaviour of a plastic leaded surface mount assembly under a complete power cycle by means of real-time holographic interferometry (RTHI). The specimen is a 100-leads plastic quad flat pack (PQFP) assembled to an FR-4 printed circuit board (PCB). The deformation types and magnitudes of whole assembly, including the PQFP, the PCB, the lead and solder joints, are obtained. Deformation responses with different power levels are measured. Then the thermal fatigue mechanism of the lead of PQFP and solder joints is discussed based on the experimental results.

**EEACC:** 0170J, 2210, 0170E, 0590