

板级跌落碰撞下无铅焊点的可靠性研究

刘 芳¹, 孟 光¹, 赵 玫¹, 赵峻峰²

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240; 2. 英特尔技术开发(上海)有限公司, 上海 200131)

摘 要: 文中引入一块不同于 JEDEC 标准测试板的圆形测试板, 探究板级跌落碰撞下无铅焊点的可靠性. 首先做模态试验了解测试板的动力学特性, 接着做跌落测试, 同时测量板的应变和加速度历程. 并用 ABAQUS 软件进行模拟, 模拟焊点在跌落碰撞条件下焊点的应力应变等. 结果表明有限元模拟得到的应变、板中心的加速度响应和试验吻合, 而且用模拟预测的失效焊点的位置与试验一致. 失效模式是靠近封装一侧的金属间化合物(IMC)界面的脆性断裂.

关键词: 无铅焊点; 板级跌落; 有限元; 金属间化合物; 失效

中图分类号: TN306 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2083-04

Researches of Lead-Free Solder Joint Reliability Under Board-Level Drop Impact

LIU Fang¹, MENG Guang¹, ZHAO Mei¹, ZHAO Jun-feng²

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Intel Technology Development (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200131, China)

Abstract: Different from JEDEC standard test board, a round test board was introduced to do drop test and simulation. Lead-free solder joint reliability under board-level drop impact was investigated. Firstly, modal test was conducted in order to understand dynamic properties of test board. Secondly, strains and acceleration of test board were measured during drop test, and ABAQUS software was used to do drop simulation and model stresses and strains of solder joints under drop impact. Results show that the model established has close values of acceleration response and strain histories as measured in actual drop test, and the failure mode and critical solder ball location predicted by modeling correlate well with testing. The fracture occurs in intermetallic composite (IMC) on the package side. Failure mode is brittle fracture.

Key words: lead-free solder joint; board-level drop; finite element; intermetallic composite; failure

1 引言

随着电子产品的小型化、便携化, 跌落碰撞下板级连接焊点的可靠性在国外已成为研究热点. 美国电子工程联合会 (JEDEC) 早已颁布了规范便携式电子产品的跌落测试标准^[1]. 但是由于 JEDEC 标准板上的芯片根据应力应变水平分为六组, 虽然有利于评价在板上不同元件位置的失效率, 但每组样本最多的也仅 4 个芯片, 不利于后续的分析, 有待改进^[2]. 随着国际电子联盟无铅化的发展和铅等有毒物质禁用法律法规条文的颁布, 电子产品无铅化是必然趋势. 无铅焊点的失效模式机理是不同于锡铅焊点, 无铅焊料的使用对于焊球跌落碰撞可靠性的研究又是一个新的挑战, 有待进一步的研究^[3,4]. 另外, 有限元模拟方法方便快捷, 被广泛应用于电子封装的可靠性研究^[3,5~7], 但是研究无铅焊点可靠性时, 将有限元模拟和试验对比, 而且对比结果比较

理想的文献很少.

本文引入一块圆形电路板 (PCB), BGA (ball grid array) 封装器件用无铅焊料贴在板上, 焊球大小为 0.35mm, 球间距为 0.8mm. 首先做模态试验了解圆形 PCB 的动力学特性, 接着做板级跌落试验, 测量板的应变和加速度历程, 并用 ABAQUS 软件进行模拟. 模拟在跌落碰撞条件下焊点的应力应变. 试验和有限元两种方法研究跌落条件下无铅焊点的失效位置和失效机理.

2 测试试件

基于跌落台的尺寸, 文中引入贴装八个封装元件的圆形 PCB. 该 PCB 的设计制作同 JEDEC 测试板. 其直径为 160mm, 厚度是 1mm, PCB 上焊盘类型为非焊接屏蔽界定 (NSMD), BGA 封装的大小为 11mm × 13mm. 跌落时, 板上八个 BGA 封装处于同一应力应变水平, 则通过威布尔分布, 可直接进行分析, 而不用考虑板上元件位

置的载荷情况.

3 模态测试

因为 PCB 组件的结构简单小巧,因此选用了力锤测试方法.为了减少传感器的影响,选用一个小型的传感器.图 1 为测试系统框图,其中 PCB 上标有测点分布.模态测试时,响应点固定为第 36 点,移动力锤依次激励 PCB 组件上每个测点.测点和响应点的信号均由 DP 同时采集,采集信号再经过后处理软件就可以得到模态结果.

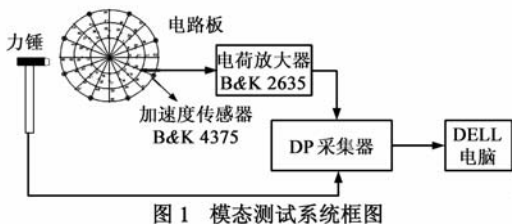


图 1 模态测试系统框图

Tee 及其合作者发展了 input-G 方法^[8].在我们的模拟中也使用了这种方法.碰撞加速度脉冲能用测试仪器测得,作为板级测试试件的边界条件.这样便可以仅模拟测试试件,且如何处理边界条件成为有限元分析的关键.事实上,在有限元分析中很难模拟真实的边界条件.本文采用模态试验和有限元结合的方法来解决这个难题.虽然不考虑螺栓的预紧力,但是螺孔周围的一些节点应该被约束.PCB 组件在跌落时用八个螺钉固定在台子上.所以模态测试时也采用相同的边界条件,通过模态试验来确定此时的边界条件.表 1 描述了模型分别在边界条件的两种不同处理情形下的结果.模型 1 是仅约束螺孔上节点的情形,模型 2 是包括约束螺孔周围部分节点的情形.从表 1 中可以看出模型 2 的拟和比模型 1 好.模型 2 的有限元分析结果与模态试验结果吻合很好.因此选择模型 2 作为跌落测试模型.

另外,通过试验模态测试,还可以得到阻尼率.而 ABAQUS 软件^[9]作有限元分析时需要的是 Rayleigh 阻尼,且这两种阻尼之间的关系为

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + 2\beta\omega_i \quad (1)$$

其中 i 是给定振型, ξ_i 是临界阻尼比, α 和 β 是瑞利阻尼参数.事实上, α 趋近于 0,因此很容易得到 β 值.这样也就完全确定了 Rayleigh 阻尼参数.因此,通过模态测试可以更新有限元模拟的边界条件,其 PCB 组件的阻尼率也可以通过 DP 的后处理得到.

表 1 PCB 组件的固定条件下第一阶频率

测试	模型 1		模型 2	
	第一阶 (Hz)	差别 (%)	第一阶 (Hz)	差别 (%)
174.51	160.94	-7.78	175.6	0.62

4 跌落试验和模拟

4.1 跌落试验

在跌落测试中采用脉冲控制的跌落测试.跌落测试框图如图 2.跌落台从一定高度释放撞击到碰撞表面.PCB 用支座固定在底座上.板和底座之间有 20mm 的刚性支座连接,能让 PCB 弯曲自如.理想情况下,跌落碰撞过程中支座会同时移动.在底座一个特定的位置固定一个加速度传感器来监测半正弦碰撞脉冲的峰值加速度和持续时间.文中跌落测试方向总是 PCB 水平放置,元件朝下.

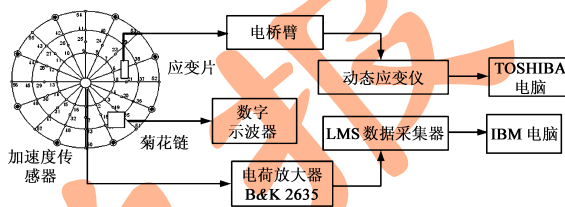


图 2 跌落测试框图

跌落测试中,虽无法测试焊点的应力应变,但 PCB 的力学行为和焊点失效密切相关.所以试验中测试了板中心的加速度,还有关键焊点对应的电路板的应变(未贴装元件一侧).首先,动态应变仪用来测量 PCB 的平面应变.为了测量 PCB 的周向和径向的应变,将连接到动态应变仪上的两个应变片贴到 PCB 没有元件的那一面.其次,LMS 用来记录 PCB 的输入输出加速度.测量碰撞脉冲,将一个加速度传感器装在台子上固定 PCB 的支座附近,另一个传感器固定在 PCB 的中心.这两个加速度传感器的信号经电荷放大器连接到 LMS 测试仪器上.最后,用数字示波器监测菊花链连接的焊点的动态电阻的动态电压.电阻 R_0 与菊花链串联连接到直流电源上,焊点的动态电阻 R_x 为

$$R_x = \frac{R_0 V}{E - V} = \frac{R_0}{E/V - 1} \quad (2)$$

这里 E 是电源电压, V 是菊花链 R_x 的动态电压,为了方便,用数字示波器监测电压值而不是电阻值.当 $V \rightarrow E, R_x \rightarrow \infty$ (开路)时,暗示关键焊点失效.

4.2 有限元模拟

应用 ABAQUS 软件进行有限元分析和模拟.在跌落模拟中为了减少计算时间,采用圆形测试板的八分之一作为分析模型,且焊球的网格比较粗,模型选择的单元类型为 C3D8R,八分之一模型包括

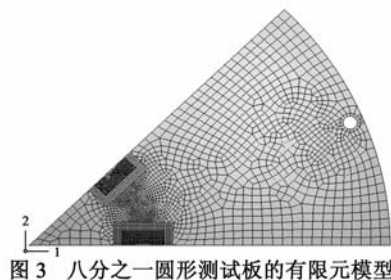


图 3 八分之一圆形测试板的有限元模型

22659 个单元和 31405 个节点,如图 3 所示。

PCB 固定在跌落台上,跌落台从 0.34m 的高度跌落碰撞产生 1500G,0.55ms 的半正弦加速度脉冲.采用 input-G 方法进行模拟.图 4 和图 5 分别是周向应变历程图和板中心的加速度响应.从这两个图中可以看出,模拟结果与试验测量值很吻合。

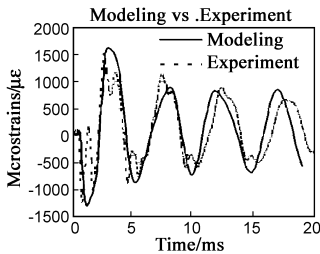


图 4 周向应变

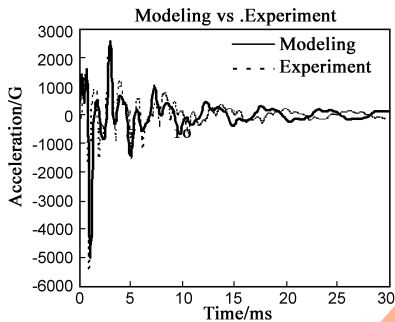


图 5 中心加速度响应

4.3 结果与讨论

跌落测试后做了金相试验来探求失效焊点的位置和焊点的失效机理.从金相试验中通过光学显微镜很容易知道失效的 BGA 封装中四个最外围拐角的焊点最先坏掉.图 6 是失效焊球的金相截面图,展示了焊球断裂是靠近封装硅片一侧的金属间化合物导致的脆性断裂。

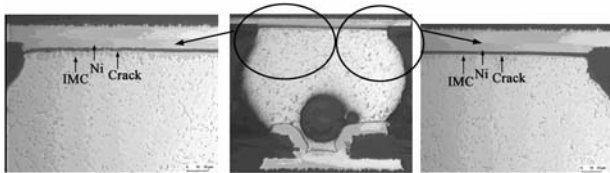


图 6 失效焊点的金相截面图

PCB 组件在跌落冲击作用下会使电路板产生挠曲,而这些往复弯曲会使板级连接的焊点受到反复的拉压应力,最终导致焊点连接失效,因此在用 ABAQUS 软件作有限元分析时用焊点承受的拉应力 S33 来判断焊球的失效先后.模拟分析得到的所有焊点的最大拉应力见图 7,最大的拉应力为 190.92MPa,在封装角落上的焊点有较大的拉应力,说明角上的这些焊球很容易断裂.且从该图中可以看出最大拉应力出现在封装基板和焊点之间的界面,这意味着最初的裂纹将出现在这个界面附近。

从有限元分析和跌落测试结果的比较得到本文板级跌落测试模拟非常有效.建立的模型的计算结果与跌落试验中测试的应变和输出加速度响应很吻合,而且有限元模拟和跌落试验得到的失效焊点的位置和焊点裂纹产生的地方都一致。

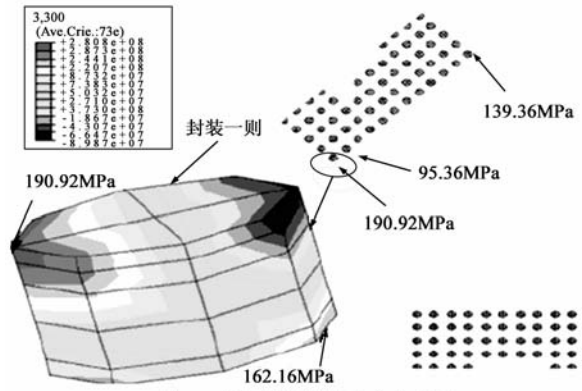


图 7 板上焊点的最大拉应力图

5 结论

本文主要引入了不同于 JEDEC 标准的圆形测试板,对板级跌落碰撞条件下无铅焊点的失效机理进行了研究.首先通过模态试验确定了一个有效的跌落模拟模型,为进行跌落模拟分析奠定了好的基础.接着进行跌落试验和跌落模拟.最终,有限元模拟得到的结果和试验测得的响应很吻合.有限元和试验得到的失效焊点的位置一致,均为 BGA 封装四个最外围拐角的焊点首先失效,并且二者得到的失效焊点产生初始裂纹的地方也吻合,无论是模拟还是试验得到的都是 BGA 封装与无铅焊点连接的 IMC 界面处,且是脆性断裂.有限元分析和试验得到了一致的动力学响应,这为后续无铅焊点寿命研究奠定了良好的基础。

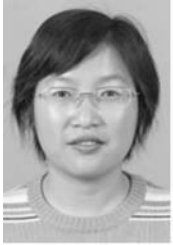
参考文献:

- [1] JEDEC Standard JESD22-B111, Board level drop test method of components for handheld electronic products[S]. 2003.
- [2] ZHAO J F, et al. Mechanical modeling and analysis of board level drop test of electronic package[A]. In: Proc 56th Electronic Components and Technology Conference [C]. San Diego, USA:2006. 436 – 442.
- [3] LIU Y L, et al. Lead-free chip scale packages: assembly and drop test reliability[J]. IEEE Trans, 2006, EPM-29(1): 1 – 9.
- [4] JENQ S T, et al. High-G drop impact response and failure analysis of a chip packaged printed circuit board[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007(34): 1655 – 1667.
- [5] 和平,等. Vf-BGA 封装焊球热疲劳可靠性的研究[J]. 半导体学报, 2004, 25(7): 874 – 878.

HE P, et al. Solder joint fatigue reliability of vf-BGA package

- [J]. Chinese journal of semiconductors, 2004, 25(7): 874 – 878. (in Chinese)
- [6] PRADEEP L, et al. Solder joint reliability in electronics under shock and vibration using explicit finite-element submodeling [J]. IEEE Trans., 2007, EPM-30(1): 74 – 83.
- [7] SPRAUL M, et al. Reliability of SnPb and Pb-free flip-chips under different test conditions[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(2): 252 – 258.
- [8] TEE T Y, et al. Advanced experimental and simulation techniques for analysis of dynamic responses during drop impact [A]. Proc 54th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)[C]. Las Vegas, NV, 2004. 1088 – 1094.
- [9] 庄苗, 等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社 2005.

作者简介:



刘 芳 女, 1976 年 11 月生于湖北荆州, 上海交通大学机械与动力工程学院博士生. 主要研究方向为电子封装可靠性, 振动、冲击分析与控制等. E-mail: fangl@sjtu.edu.cn



孟 光 男, 1961 年 1 月出生, 博士, 上海交通大学机械设计及理论学科“教育部长江学者奖励计划”特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 机械系统与振动国家重点实验室主任, 博士生导师. 主要研究方向为旋转机械转子动力学、振动理论及振动智能控制、MEMS 的动力学与振动; 智能机械、结构与控制. E-mail: gmeng@sjtu.edu.cn

电子学报