

[文章编号] 1004- 0609(2002)S1- 0227- 05

# 塑料封装球栅阵列器件焊点的可靠性<sup>①</sup>

张礼季, 王 莉, 高 霞, 谢晓明

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 上海新代车辆技术有限公司, 上海 200050)

**[摘 要]** 对比了充胶和未充胶塑料封装球栅阵列(PBGA)器件在- 40 ℃~ 125 ℃温度循环条件下的热疲劳寿命, 采用光学显微镜研究了失效样品焊点的失效机制, 并分析了充胶提高器件热疲劳寿命的机制。实验发现: 底充胶可使 PBGA 样品的寿命从 500 周提高到 2000 周以上, 失效样品裂纹最先萌生于最外侧焊球中近硅芯片界面外边缘处, 界面处焊料组织粗化及界面脆性金属间化合物  $\text{Ni}_3\text{Sn}_2$  和  $\text{NiSn}_3$  相的生成均促使裂纹沿该界面从焊球边缘向中心扩展。PBGA 焊点界面处裂纹的萌生和扩展是该处应力应变集中、焊料组织粗化以及生成脆性金属间化合物等各种金属学和力学因素共同作用的结果。

**[关键词]** 球栅阵列; 可靠性; 底充胶; 晶粒粗化; 金属间化合物

**[中图分类号]** TN 406; TG 115

**[文献标识码]** A

球栅阵列封装技术(Ball grid array, BGA)问世于 20 世纪 90 年代, 该封装形式既具有十分高的封装密度, 又具有优良的电性能、低噪声、低寄生电感电容等优点; 同时和现有的表面组装(Surface mount technology, SMT)设备完全兼容, 因而和芯片级封装(Chip scale package, CSP)一起成为未来电子封装的主流技术<sup>[1]</sup>。

BGA 源自 IBM 公司发明的 C4(Controlled collapse chip connection)技术<sup>[2~ 4]</sup>, 其基本特征是以位于微电子器件实体下的焊料球作为外引脚来实现芯片与 PCB(Printed circuit board)板的连接。研究发现: 采用锡铅焊料直接将硅芯片面朝下焊接到基板上的倒装焊技术, 由于芯片同有机板的热膨胀系数严重失配, 热循环可靠性并不理想<sup>[3]</sup>; 而对于 BGA 器件来说, 由于直接与芯片相连的基板(一般为 BT 或 PI 等<sup>[2, 5]</sup>)具有同有机板相近的热膨胀系数, 因此具有较高的热疲劳寿命。将含有均匀分布  $\text{SiO}_2$  颗粒的环氧树脂填充到芯片和基板空隙的底充胶技术虽然可以大大提高倒装焊接器件的热疲劳寿命, 然而对于 BGA 器件来说, 即使未经过底充胶也可以得到较高的热循环寿命, 并且 BGA 最初也正是工业界为了避免芯片倒扣工艺中底充胶这一步<sup>[6]</sup>而发明的。最近人们发现, 不同 BGA 产品, 尤其是未充胶产品, 随着热循环的进行, BGA 器件焊点微组织和结构变化以及界面金属间化合物的形成将导

致剪切强度以及 BGA 器件的抗机械冲击以及震动性能的降低<sup>[7, 8]</sup>。而且, 即使就热疲劳寿命而言, 未充胶 BGA 器件的寿命也不能满足某些领域的高可靠性要求。与传统的四面引线扁平封装(Quad flat package)相比, BGA 因缺少柔性引线吸收变形, 焊点的可靠性问题也很突出。文献[3]表明, BGA 很少应用于航空等对可靠性要求较高的领域。

鉴于以上原因, 本文中作者对比了两组 PBGA 样品(充胶和未充胶)在设定温度循环条件下的热疲劳寿命, 重点研究了有裂纹器件中裂纹的萌生位置和扩展方向, 焊点微组织和结构粗化以及焊料与焊盘金属化层的界面反应问题。

## 1 实验

实验采用的 BGA 样品为内引线键合形式的 PBGA, BGA 焊球为  $6 \times 8$  阵列。其结构如图 1 所示, 相关数据见表 1。采用共晶焊料, 焊盘金属化层从里到外分别为 Cu 和 Ni。

表 1 PBGA 器件相关数据

Table 1 Relative data of PBGA components

| Thickness of chip / mm | Diameter of welding plate/ mm | Distance between welding ball/ mm | Height of welding ball/ mm |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 0.324                  | 0.35                          | 0.80                              | 0.253                      |

① [基金项目] 上海市科技发展基金资助项目(00XD14027)

[收稿日期] 2001- 09- 07; [修订日期] 2001- 11- 19

[作者简介] 张礼季(1978- ), 男, 硕士。

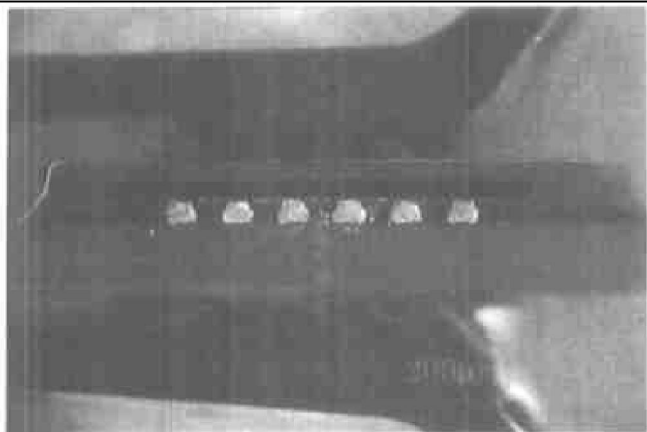


图 1 PBGA 器件外形图  
Fig. 1 Overview of PBGA sample

焊点可靠性采用温度循环实验来考察, 设备为 WEISS 公司 TS130 型温度循环箱, 高低温分别为 125 °C 和 -40 °C, 高低温停留时间各为 15 min, 升降温时间均小于 10 s。经不同周次温度循环的样品取出后在光学显微镜和扫描电镜下进行剖面观察与分析; 同时, 对 2 000 周的未充胶样品还作了断口分析。

## 2 结果及讨论

### 2.1 裂纹萌生和扩展

#### 2.1.1 未充胶样品的焊点寿命及裂纹萌生与扩展

对于热循环 500 周的未充胶样品, 随机抽取 4 个进行金相微切片实验, 发现 500 周时焊料球中已经有裂纹萌生, 但是裂纹只出现在各个焊球的左右两端, 并没有完全贯穿整个焊球; 而且, 对于同一排不同位置的焊球, 裂纹的萌生位置和扩展程度也不相同, 如图 2 所示。最左侧钎料球左上角处的裂纹长度最长, 相应地, 最右侧钎料球右上角的裂纹也最长, 而中间位置的焊球即使在边角处也只有少量裂纹, 并且 4 个样品的结果都一样。由此可以看出, 热循环至 500 周时有的焊球裂纹已经接近芯片焊盘的一半, 可视为临界失效。

对于 1 000 周末充胶样品, 亦随机抽取 4 个进行剖面实验, 发现所有样品、所有焊点皆完全开裂 (贯穿)。典型照片如图 3 所示。

对比热循环 500 周和 1 000 周样品的裂纹情况, 即可推断裂纹由焊球左右两端萌生, 并且随着热循环的进行逐渐向中间扩展。

#### 2.1.2 已充胶样品的焊点寿命

为了研究充胶对 PBGA 样品热疲劳寿命的影响, 作者还对 4 个充胶样品进行了热循环实验及剖

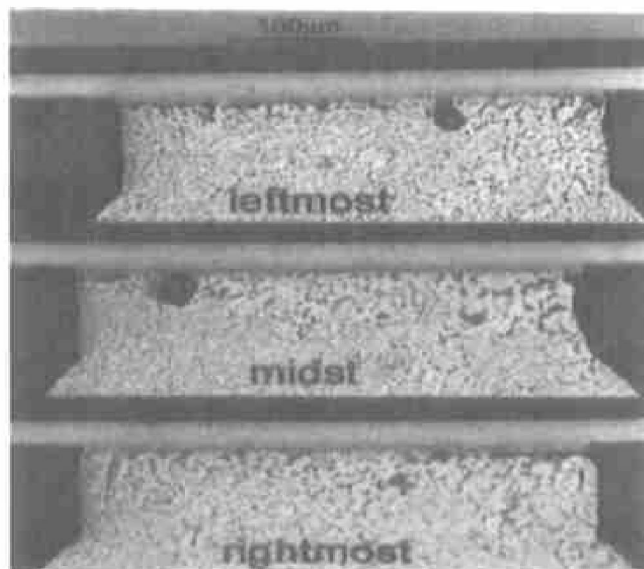


图 2 500 周温度循环的未充胶样品形貌  
Fig. 2 Morphology of sample without underfill  
(500 cycles)

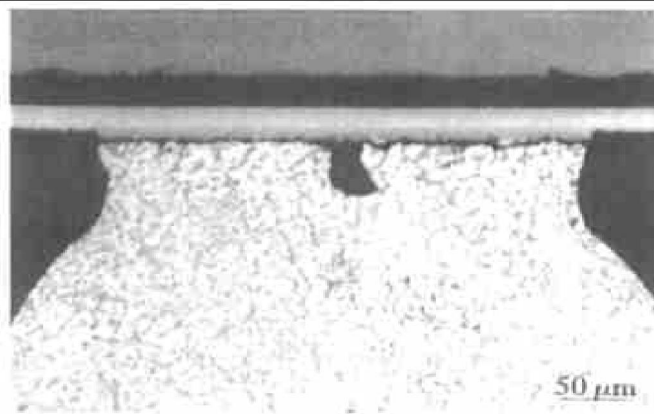


图 3 1 000 周温度循环的未充胶样品形貌  
Fig. 3 Morphology of samples without underfill  
(1 000 cycles)

面观察。实验结果表明: 即使温度循环至 2000 周, 充胶器件仍然完好无损, 但是在焊球上下靠近 BT 与 FR4 焊盘附近处可以看到焊料组织粗化十分严重。因为晶粒粗化本质上属于应力诱导再结晶, 其动力来自应力应变引起的畸变能, 对于未充胶器件, 由于部分畸变能用于裂纹萌生和扩展, 因此粗化没有充胶器件的那么严重, 见图 4(a) 和 (b)。

#### 2.1.3 充胶提高器件热循环寿命的机制

众所周知, 与衬底材料粘为一体的芯片和有机基板的热膨胀系数失配导致在冷热循环过程中产生水平位移差, 从而在焊点内部产生应力应变。如果器件没有进行底充胶, 这些应力将全部加在焊点上, 并且边角处的应力最大, 从而在此处最早萌生裂纹。对于不同焊点, 应力应变水平也不同, 由经验公式可知, 越是边缘的焊点, 应力集中越严重,

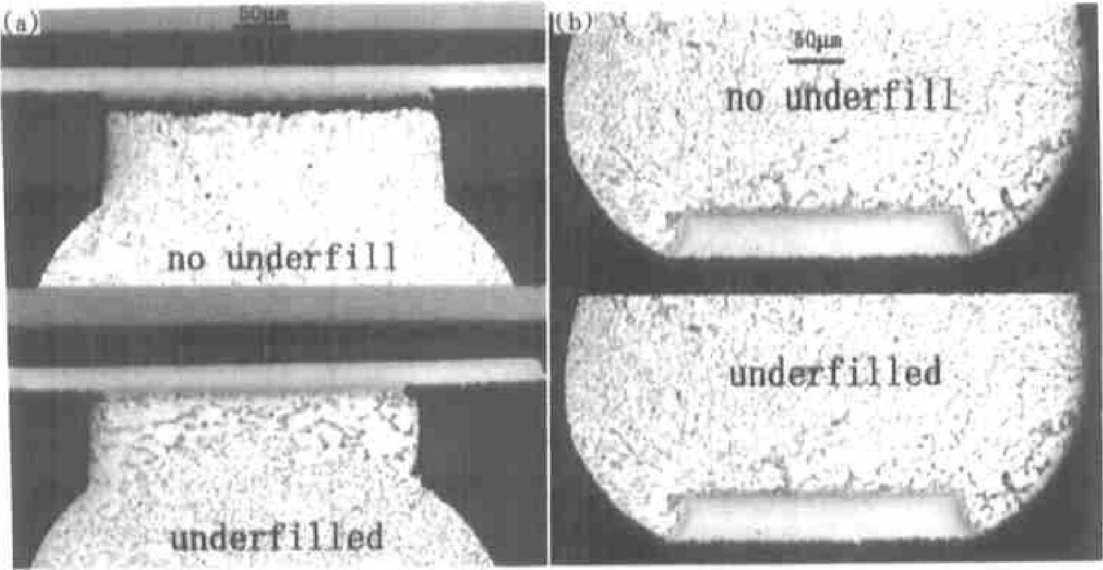


图 4 2 000 周样品的组织比较

**Fig. 4** Comparison of microstructures of samples (2 000 cycles, no underfill)

(a) —Component side; (b) —Substrate side

裂纹萌生得也就越早;而底充胶不仅可以使应力在焊点阵列均匀分布,还可以大大降低焊点内的应力值。模拟结果表明:充胶后焊点内的最大应力值仅为充胶时的几十分之一<sup>[6, 9]</sup>。由于充胶后焊点内的最大应力值远小于未充胶器件的,因此热疲劳寿命得到大大提高。

2.2 关于金属间化合物(IMC)

本实验采用的样品焊料为 Sn-Pb-Ag, 焊盘金属化层为 Cu-Ni, 热循环过程中 Ni/Sn 界面将发生化学反应,生成脆性的金属间化合物。从高倍光学显微镜照片可以明显看出: Ni/Sn 界面反应产物有两层,其中靠近焊盘的一层非常平整,而靠近焊料的另一层呈岛状。并且热循环 2 000 周的样品中 IMC 最厚。

为了进一步确定金属间化合物的成分及其对裂纹扩展的影响,作者还对热循环 2 000 周的已断开的未充胶 PBGA 样品作了断口成分分析。从图 5(a)中可以看到,断口包括两个区域,一部分组织比较致密平整(如箭头 1 所示),而另一部分组织很粗糙(如箭头 2 所示)。局部放大组织如图 5(b)所示。EDS 结果表明:粗糙区域是锡铅银焊料,而组织致密平整的区域为金属间化合物,并且器件端和基板端的 IMC 成分并不一样。表 2 所列是器件端和基板端 IMC 成分分析结果。

从表 2 中两种金属间化合物的摩尔分数可以推断出:光学显微镜下靠近芯片焊盘的那层 IMC 为  $Ni_3Sn_2$ ,而靠近焊料的那层 IMC 为  $NiSn_3$ 。虽然在

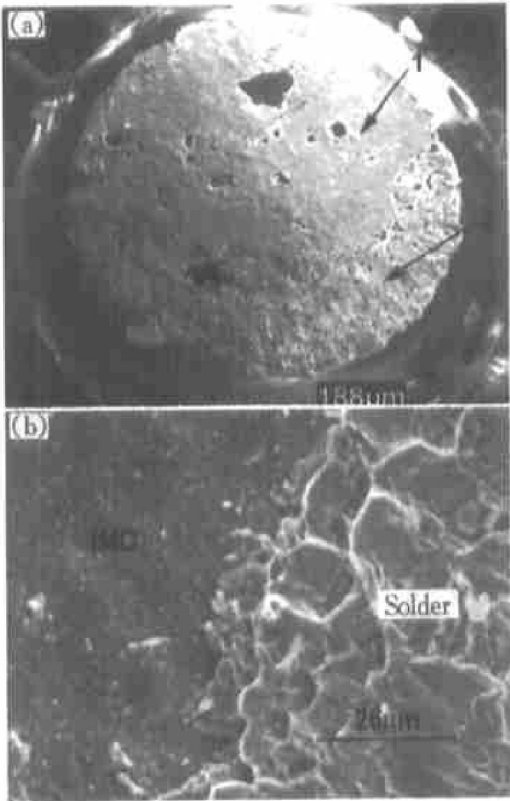


图 5 2 000 周末充胶样品断口形貌图

**Fig. 5** Fractograph of samples without underfill (2 000 cycles)

表 2 器件端和基板端 IMC Sn, Ni 元素含量

**Table. 2** Contents of Sn and Ni on both component side and substrate side

| Zone      | $x(Sn) / \%$ | $x(Ni) / \%$ |
|-----------|--------------|--------------|
| BGA       | 47.12        | 52.88        |
| Substrate | 85.73        | 14.27        |

现有的平衡相图<sup>[10]</sup>中并没有  $\text{NiSn}_3$  相,但文献[11, 12]中有过类似的报道。断口分析可以得出这样的结论:裂纹有两种扩展机制,有的裂纹沿着芯片焊盘附近焊料内部的粗大晶粒扩展,有的则沿着两层金属间化合物的界面扩展。由于  $\text{Ni}_3\text{Sn}_2$  和  $\text{NiSn}_3$  界面相对平直,因而断口致密平整。

另外,光学显微镜观察还发现,不同位置的焊球断口 IMC 区域所占面积分数并不相同。焊球阵列中间位置的焊球中,IMC 所占断口面积比例较大,而阵列边缘部分的焊球焊点主要是在界面附近的焊料内断开,如图 6 所示。

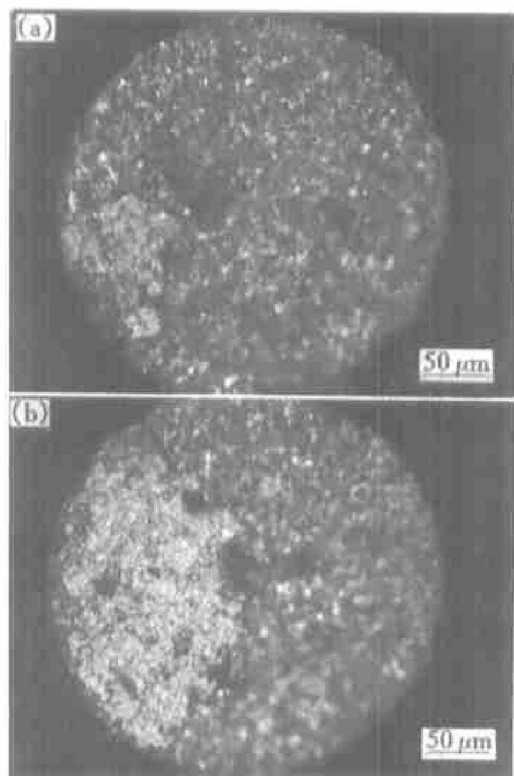


图 6 不同焊球断口形貌

Fig. 6 Fractographs of different solder ball

(a) —Outer solder ball; (b) —Inner solder ball

### 3 结论

1) 未充胶 PBGA 样品在热循环 500 周时焊点内已有裂纹产生,不能满足某些领域对器件的高可靠性要求。

2) 充胶可以使热应力在焊点阵列内均匀分布,并大大降低最大应力值,从而改善 PBGA 的热疲劳寿命,实验表明即使经过 2 000 周的温度循环,除了界面附近的组织粗化之外,焊点没有开裂的迹象。

3) 不同的焊球、甚至同一焊球的不同位置,裂纹萌生位置和扩展的程度也不相同。

4) 断口分析发现断面包含两个 IMC 区域,说明有的裂纹沿着芯片焊盘附近焊料内部的粗大晶粒扩展,有的则沿着两层金属间化合物的界面扩展。

5) 裂纹萌生由焊球近硅芯片界面处的左右两端萌生,随着热循环的进行逐渐沿该界面向中间扩展。界面处裂纹的萌生和扩展是应力应变集中、焊料组织粗化、脆性金属间化合物的生成等各金属学和力学因素共同作用的结果。

### 致谢

盛玫、于丽红小姐和肖克来提博士曾协助作者做扫描电镜实验;另外,肖克来提、张群、程波三位博士还给作者提出许多有价值的建议,在此向他们表示衷心的感谢!

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Lau J H. Ball Grid Array Technologies [ M ]. New York: McGraw-Hill Inc, 1995.
- [ 2 ] Romenesko B M. Ball grid Array and flip chip technologies: their histories and prospects [ J ]. The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 1996, 19( 1 ): 64– 74.
- [ 3 ] Miller L F. Reliability of controlled collapse reflow chip joining [ J ]. IBM Journal of Research and Development, 1969, 13( 3 ): 266– 271.
- [ 4 ] Miller L F. Controlled collapse reflow chip joining [ J ]. IBM Journal of Research Develop, 1969. 239– 250.
- [ 5 ] Walshak D, Hashemi H. BGA Technology: Current State of the Art and Future Direction for Plastic, Ceramic, and Tape BGAs [ J ]. Advancing Microelectronics, 1995, 21( 1 ): 14– 15, 38– 41.
- [ 6 ] Lejun Wang, Wong C P. Recent advances in underfill technology for flip chip, ball grid array, and chip scale package applications [ A ]. XIE Xiaoming. High Density Packaging and Component Failure Analysis [ C ]. Shanghai, 2000. 1– 8.
- [ 7 ] Chan Y C, Tu P L, Tang C W, et al. Reliability studies of microBGA solder joints-effect of  $\text{Ni-Sn}$  intermetallic compound [ J ]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 24( 1 ): 25– 31.
- [ 8 ] John H L Pang, Kwang Hong Tan, Wang Z P. Thermal cycling aging effects on microstructural and mechanical properties of a single PBGA solder joint specimen [ J ]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24( 1 ): 10– 15.
- [ 9 ] Han B, Guo Y. Thermal deformation analysis of various electronic packaging products by moire and microscope

- moire interferometry [J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117: 185.
- [10] Hansen P M, Anderko N K. Constitution of Binary Alloys [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1958. 1042.
- [11] Harman A C. Rapid tin-nickel intermetallic growth: some effects on solderability [A]. Proceedings of the Technical Programme InterNepcon' 78 [C]. Brighton, England, 1978. 42- 49.
- [12] Haimovich J. Intermetallic compound growth in tin and tin-lead platings over nickel and its effects on solderability [J]. Welding Research, 1989(Supplement): 102-114.

## Welding reliability of plastic ball grid array component

ZHANG Li-ji, WANG Li, GAO Xia, XIE Xiao-ming

(Daimlerchrysler SIM Technology Co. Ltd,  
Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,  
Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

**[ Abstract ]** Failure mechanism, as well as failure cycles of two groups of plastic ball grid array ( PBGA ) samples ( with/ without underfill ) under thermal cycling conditions in the range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , were presented. The experiment results show that underfill can improve the thermal cycle life of PBGAs drastically, from 500 cycles to over 2 000 cycles. Highly concentrated stress and strain induced by the mismatch of thermal expansion coefficient between the BGA component and the printed circuit board, coarsened grain and two kinds of intermetallic compounds (  $\text{Ni}_3\text{Sn}_2/\text{NiSn}_3$  ) which formed during reflow and thermal cycle and their negative effects on the reliability of solder joints were discussed. It is found that the initiation and propagation of micro-crack are caused by all the three factors above. The initiation of the crack and direction of its propagation were also presented.

**[ Key words ]** BGA; reliability; underfill; coarsened grain; intermetallic compound

( 编辑 杨 兵 )