

温度循环对 CCGA 焊柱可靠性影响

南旭惊, 刘晓艳, 陈雷达, 张涛
(西安微电子技术研究所, 西安, 710600)

摘要: 陶瓷柱栅阵列 (CCGA) 封装因其优良的电热性能和高密度的信号互连, 成为高可靠封装形式的首选, 但由于封装形式及材料本身特性, 在温度循环过程中的焊点开裂失效是需要重点关注的。文中以 CCGA484 为例, 研究在 $-65 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度循环条件下, CCGA 焊柱形貌、焊点显微组织及抗剪强度的变化。结果表明, 在温度循环过程中, 板级组装后 CCGA 器件的焊柱逐渐发生蠕变变形, 焊点界面依次生成硬脆的 Ni_3Sn_4 , Ni_3Sn_2 和 Ni_3Sn 金属间化合物 (IMC), 且总厚度逐渐增加, 这些硬脆相的增厚会导致温度循环过程中应力集中程度的加剧, 累积到一定程度会引发焊点断裂, 与此对应, 焊点的抗剪强度逐渐下降。

创新点: 文中针对 CCGA 封装器件外引脚焊柱的可靠性开展温度循环试验, 揭示温度循环过程中焊柱的失效演化过程及内在机理, 丰富 CCGA 电路的可靠性评估的参考依据, 为 CCGA 封装的发展及应用提供理论指导。

关键词: 陶瓷柱栅阵列; 温度循环; 金属间化合物; 可靠性

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200331003

0 序言

随着电子元器件封装密度的增加, 陶瓷球栅阵列 (CBGA) 和陶瓷柱栅阵列 (CCGA) 因其高密度的面排布引脚形式, 在航空航天等高可靠性领域产品中得到了广泛应用^[1-2]。CBGA 和 CCGA 封装器件分别通过陶瓷管壳上的焊球和焊柱实现与 PCB 基板的组装互连, 由于氧化铝陶瓷管壳 (热膨胀系数为 $6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 和 PCB 基板 (热膨胀系数为 $18 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 的热膨胀系数差了近 3 倍, 这种差异会在温度变化过程中产生剪切应变而导致裂纹萌生, 进而引发焊点失效, 因此温度循环成为了封装器件可靠性评估的关键手段。CCGA 封装是在 CBGA 封装的基础上, 用柱栅阵列代替了球栅阵列, 增加互连引脚的距离, 大大缓解了热膨胀系数不匹配带来的焊点失效问题, 提高了焊点的可靠性, 成为大尺寸产品封装的更优选择^[3-5]。

在温度循环过程中, 焊点的界面显微组织会发生变化, 包括金属间化合物 (IMC) 的成分及厚度等^[6-8], 界面的显微组织会影响焊点的可靠性, 焊点的抗剪强度是反映其可靠性最直观的方式, 因此分析温度循环过程中焊点的显微组织与抗剪强度的

演变关系对揭示 CCGA 封装焊点的失效机理及建立可靠性评估依据具有重要的参考价值。

文中以 CCGA484 封装器件为研究对象, 分析温度循环过程中焊点的界面显微组织演变与抗剪强度的对应关系, 研究温度循环过程中焊点的失效机理, 为 CCGA 封装的发展及应用提供理论指导。

1 试验方法

1.1 原材料及试验样品制备

试验中选用高温共烧氧化铝陶瓷外壳, 型号为 CLGA484, 镀层为 Ni/Au, 焊盘直径为 $\phi 0.8 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$, 焊盘间距为 1.27 mm, 板级封装用 PCB 板上的焊盘直径为 $\phi 0.8 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$, 焊柱采用 $0.51 \text{ mm} \times 2.21 \text{ mm}$ 的 Pb90Sn10 普通高铅焊柱, 植柱和组装到 PCB 板上采用的锡膏均采用 Sn63Pb37。

试验样品制备过程为: 丝网印刷锡膏 → 植柱 → 真空回流焊接 → 清洗 → PCB 板喷印锡膏 → CCGA 器件与 PCB 焊盘喷印锡膏光学对位 → 真空回流焊接, 完成板级封装后的试验样品如图 1 所示, 将组装到 PCB 板的试样与未组装的 CCGA 器件同时进行温度循环试验, 前者用于观察不同温度循环次数下焊柱的外观形貌, 后者用于焊点的金相分析和剪切力测试。



图 1 CCGA 板级封装试样

Fig. 1 Specimen of CCGA board-level packages

1.2 温度循环条件

对 CCGA484 试验样品进行温度循环试验, 试验条件按照美军标 MIL-STD-883。温度循环曲线如图 2 所示, 温度范围为 $-65 \sim 150^{\circ}\text{C}$, 循环周期为 50 min, 高低温保温时间均为 15 min, 升降温速率相同, 试验过程中, 每隔 100 次温度循环取出进行形貌观察、剪切力测试和金相分析, 共进行 500 次温度循环。

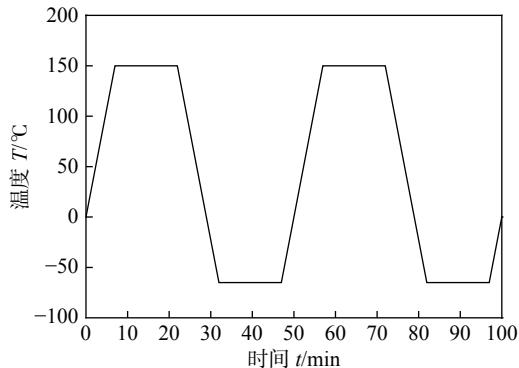


图 2 温度循环曲线

Fig. 2 Parameter of thermal cycling of CCGA solder joints

1.3 抗剪强度测试

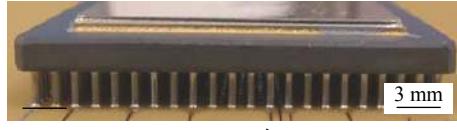
选用抗剪强度作为 CCGA 焊点的可靠性评估依据, 试验设备采用专门的微焊点强度测试仪 (DA-GE4800), 剪切速度均为 0.4 mm/s, 由于 CCGA484 器件的焊柱间距较小, 试验过程中需要铲去周围的焊柱, 保证剪切工具在行进时不会接触其它材料。

2 试验结果与分析

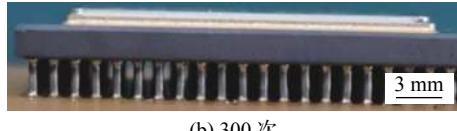
2.1 焊柱宏观形貌演变分析

由于陶瓷管壳和 PCB 板的热膨胀系数差别较大, 这种热失配会在温度变化过程中产生剪切应变, 宏观表现为焊柱发生塑性变形。

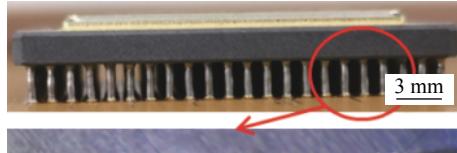
温度循环过程中焊柱形貌如图 3 所示。从图中可以看出, 温度循环次数达到 400 次时, 焊柱在反复热冲击作用下开始发生明显的塑性变形, 且表面变得更加粗糙, 焊点位置伴随有轻微的颈缩现象, 500 次后焊柱的扭曲程度进一步加剧, 但肉眼还未



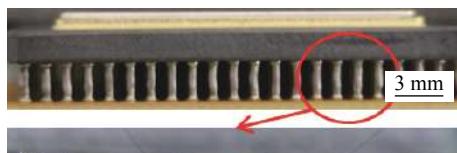
(a) 100 次



(b) 300 次



(c) 400 次



(d) 500 次

图 3 不同温度循环次数下 CCGA 封装器件的宏观形貌

Fig. 3 Evolution of solder column morphology at different thermal cycling times. (a) 100 times; (b) 300 times; (c) 400 times; (d) 500 times

观察到焊点开裂现象。

由于焊柱在长时间的高温、恒压力作用下, 即使应力小于屈服强度也会慢慢发生蠕变变形^[9]。在温度循环的升温及高温保温阶段, 陶瓷的热膨胀系数大于 PCB 基板, 焊柱发生倾斜, 在温度循环的降温及低温保温阶段, 焊柱恢复至初始状态后向相反方向偏移, 在反复的升温降温过程中, 焊柱蠕变变形逐渐累积, 达到宏观可见的扭曲状态, 而焊点钎料的强度要略大于焊柱, 因此在焊点处会有颈缩现象产生。

2.2 焊点显微组织分析

在焊点形成过程中, 钎料与焊盘金属在短时间的高温作用下扩散生成硬脆的 IMC 层, 实现焊柱与基板之间的电气和机械连接, 但是在长时间的温度循环过程中, 扩散作用导致 IMC 层厚度逐渐增

加, 其成分也会发生相应的变化, 由于 IMC 的热膨胀系数与钎料相差较大, 因此过厚的 IMC 会对焊点的可靠性产生不利的影响。

不同温度循环次数下的 CCGA 焊点界面显微组织如图 4 所示, 在温度循环前, 高铅焊柱与 Ni 焊

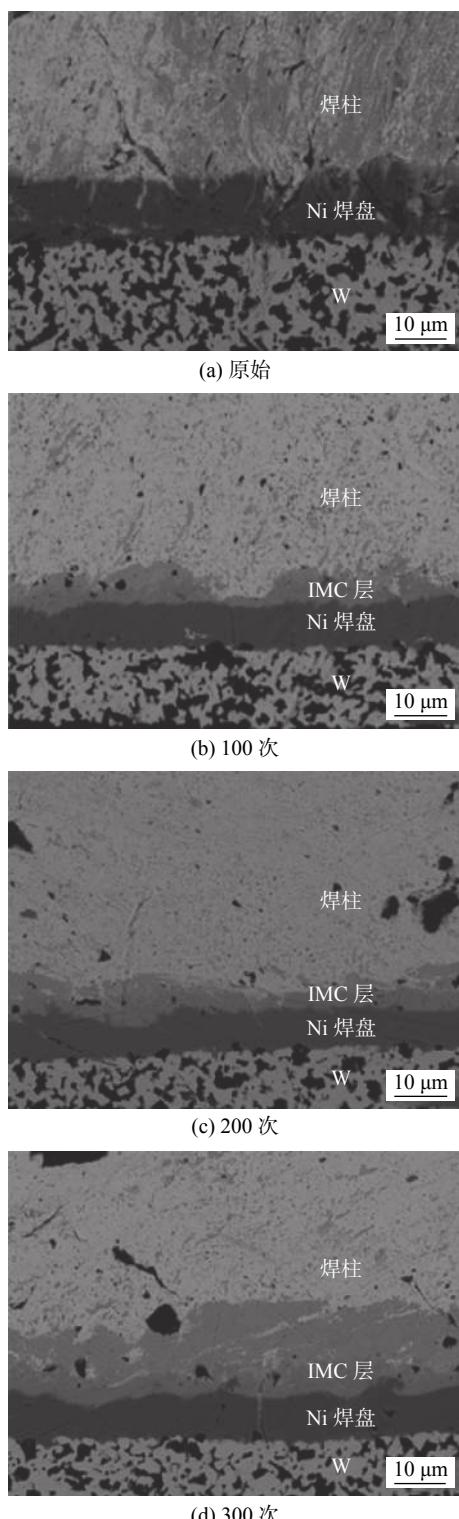


图 4 CCGA 封装器件焊点显微组织

Fig. 4 Microstructure of CCGA solder joints at different thermal cycling times. (a) original; (b) 100 times; (c) 200 times; (d) 300 times

盘界面观察不到明显的 IMC 层, 因为 Ni 相对稳定, 其界面反应层与铜相比是相当薄的, 所以观察不到, 随着循环次数增加, 界面出现不同颜色对比度的中间层, 且厚度逐渐增加, 根据 Ni-Sn 二元相图可知, Sn-Pb 钎料与 Ni 焊盘扩散反应生成的界面 IMC 从 Ni 侧依次包括 Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 和 Ni_3Sn_4 , 具体的化合物成分取决于 Sn 与 Ni 的相对浓度.

采用 EDS 分析界面 IMC 成分, 不同温度循环次数下测试 IMC 成分的位置如图 5~图 7 所示, 对应不同位置的成分如表 1 所示. 从图中可以看出, 100 次温度循环时, 界面点 1 主要为偏析的富锡相, 点 2 处 Ni 与 Sn 的原子比接近 3:4, 结合 Ni-Sn 二元相图可知, 应为 Ni_3Sn_4 化合物, 与已有的研究一致^[8]; 在 200 次温度循环后, 界面点 1 处仍为 Ni_3Sn_4 相, 靠近 Ni 焊盘侧的点 2 处 Ni 与 Sn 的原子比接近 3:2, 推测为 Ni_3Sn_2 相; 500 次温度循环后, 在 Ni 与 Ni_3Sn_2 相之间的点 2 处, Ni 与 Sn 的原子比接近 3:1, 应为 Ni_3Sn 相, 因此推测随着温度循环次数增加, 从焊柱到 Ni 焊盘之间依次生成的 IMC 为富锡相 \rightarrow Ni_3Sn_4 \rightarrow Ni_3Sn_2 \rightarrow Ni_3Sn . 分析 IMC 形成过程, 认为在温度循环前, 富锡相与 Ni 通过元

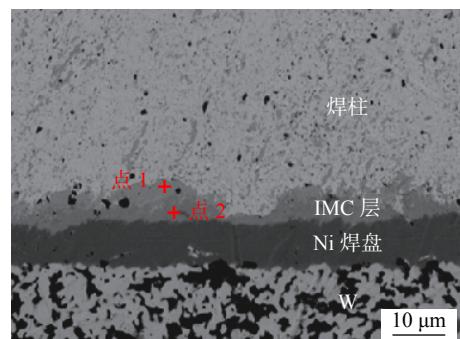


图 5 温度循环 100 次焊点界面 IMC 成分

Fig. 5 IMC component of CCGA solder joints at thermal cycling of 100 times

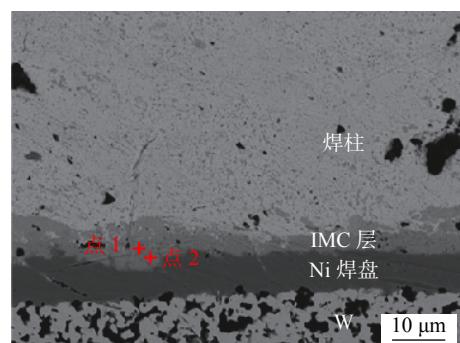


图 6 温度循环 200 次焊点界面 IMC 成分

Fig. 6 IMC component of CCGA solder joints at thermal cycling of 200 times

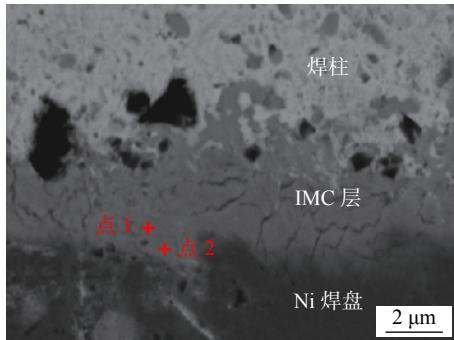


图 7 温度循环 500 次焊点界面 IMC 成分

Fig. 7 IMC component of CCGA solder joints at thermal cycling of 500 times

素相互扩散, 反应生成极少量 Ni_3Sn_4 化合物层, Ni_3Sn_4 化合物层的生成阻挡了 Sn 与 Ni 的扩散反应, Ni 与 Ni_3Sn_4 化合物层中微量的 Sn 继续发生扩

散反应, 生成 Ni 含量更高的 Ni_3Sn_2 化合物相, 之后, Ni_3Sn_2 化合物层进一步阻挡 Ni_3Sn_4 化合物层中 Sn 与 Ni 的扩散反应, 生成 Ni 含量更高的 Ni_3Sn 化合物相。统计不同温度循环次数下界面 IMC 厚度, 如图 8 所示, 两者基本呈指数为 1/2 的幂函数增长关系, 符合扩散控制机制。

界面 IMC 层存在离子键或共价键, 所以往往具有硬脆特性, 与基板和焊柱的线膨胀系数差别较大, 随着温度循环次数增加, 硬脆的 IMC 层厚度会逐渐增加, 因此焊点界面处会产生较大的应力集中, 在反复热应力作用下会萌生不同方向的细微裂纹, 如图 7 所示, 推测随着温度循环次数继续增加, 应力集中导致微裂纹沿着剪切应变方向逐渐扩展, 直到覆盖整个焊点, 导致基板与焊柱之间发生断裂失效。

表 1 不同温度循环次数下焊点界面的成分分析

Table 1 Component of CCGA solder joints at different thermal cycling times

循环次数	界面点	质量分数w(%)			原子分数a(%)		
		Pb	Sn	Ni	Pb	Sn	Ni
100	点1	13.43	76.39	10.18	7.35	72.99	19.66
	点2	4.97	69.37	25.66	2.3	55.9	41.8
200	点1	9	64.83	26.17	4.2	52.75	43.05
	点2	4.91	51.99	43.1	1.93	35.63	62.44
500	点1	8.77	45.44	45.79	3.51	31.77	64.72
	点2	8.24	28.16	63.6	2.92	17.44	79.64

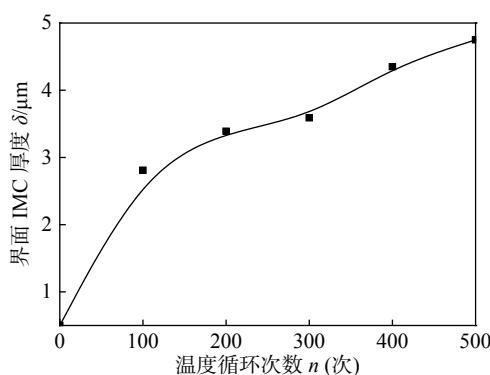


图 8 温度循环次数与界面 IMC 厚度的关系

Fig. 8 Variations of IMC thickness of CCGA solder joint with different thermal cycling times

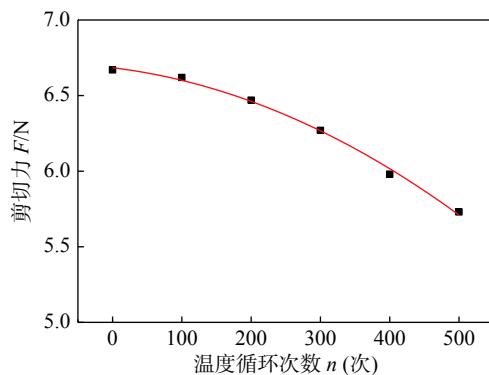


图 9 不同循环次数下焊点剪切力变化

Fig. 9 Variations of shear strength of CCGA solder joints with different thermal cycling times

2.3 抗剪强度测试结果与分析

焊点的力学性能是评估其可靠性的最直观方法之一, 采用 DAGE4800 微焊点强度测试仪测试不同循环次数下焊点的抗剪强度, 如图 9 所示。随着温度循环次数的增加, CCGA 封装焊点的抗剪强度

呈现下降趋势, 到 500 次温度循环结束, 抗剪强度相对下降了 15.6%, 且下降的速率逐渐增大。结合上文界面显微组织分析可知, 长时间高温会促进界面元素相互扩散, 依次生成 Ni_3Sn_4 , Ni_3Sn_2 和 Ni_3Sn 多种 IMC 化合物层, 且 IMC 层厚度逐渐增加, 这些

化合物与 Sn, Pb 的晶格常数和晶格结构存在较大差异, 具有较高的熔点, 呈现硬脆特性, 因此在反复塑性变形过程中会产生应力集中, 容易萌生裂纹而导致焊点失效, 所以焊点的力学性能随着 IMC 厚度增加而逐渐下降, 与已有的研究结果一致^[10]。对抗剪强度 R_t 与温度循环次数 n 之间的关系做曲线拟合, 得到下式, 即

$$R_t = 682.25 - 0.06 n - 2.77 \times 10^{-4} n^2 \quad (1)$$

根据技术指标要求, 焊柱的最小剪切力为 5.6 N, 由式(1)推算可得, 当温度循环次数大于 550 次时, 焊点的抗剪强度将不满足要求。

3 结论

(1) 温度循环超过 400 次时, CCGA 器件焊柱开始发生明显的塑性变形。

(2) CCGA 封装器件的焊点随着温度循环次数增加, 从 Ni 焊盘侧依次生成的 IMC 层成分为 $\text{Ni}_3\text{Sn} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Sn}_2 \rightarrow \text{Ni}_3\text{Sn}_4$, 且 IMC 层厚度逐渐增加。

(3) CCGA 封装器件焊点的抗剪强度随着温度循环次数增加呈下降趋势, 且下降的速率逐渐增大, 到 500 次温度循环结束, 抗剪强度相对下降了 15.6%, 这是由于硬脆的 IMC 层厚度增加, 在变形过程中导致应力集中而引发焊点失效。

参考文献

- [1] 黄丽娟, 朱正虎, 王民超. 金属封装 BGA(CCGA) 器件焊接工艺优化研究 [J]. 机械工程师, 2019(4): 163 – 165.
Huang Lijuan, Zhu Zhenghu, Wang Minchao. Research on welding process optimization of metal package BGA(CCGA) devices[J]. Mechanical Engineer, 2019(4): 163 – 165.
- [2] Ghaffarian R. CCGA packages for space applications[J]. Micro-

- electronics Reliability, 2006, 46(12): 2006 – 2024.
- [3] 任康, 刘丙金. 陶瓷球栅阵列器件转变为陶瓷柱栅阵列器件 [J]. 电子工艺技术, 2018, 39(1): 19 – 21.
Ren Kang, Liu Bingjin. Converting ceramic ball grid array component to ceramic column grid array component[J]. Electronics Process Technology, 2018, 39(1): 19 – 21.
- [4] Ghaffarian R. Thermal cycle reliability and failure mechanisms of CCGA and PBGA assemblies with and without corner staking[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(2): 285 – 296.
- [5] 李守委, 毛冲冲, 严丹丹. CCGA 用焊柱发展现状及面临的挑战 [J]. 电子与封装, 2016, 16(10): 6 – 10.
Li Shouwei, Mao Chongchong, Yan Dandan. Status-Quo and challenges of CCGA solder columns[J]. Electronics and Packaging, 2016, 16(10): 6 – 10.
- [6] Ding Ying, Tian Ruyu, Wang Xiuli, et al. Coupling effects of mechanical vibrations and thermal cycling on reliability of CCGA solder joints[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(11): 2396 – 2402.
- [7] Ramesham R. Reliability of CCGA1152 and CCGA1272 interconnect packages for extreme thermal environments[J]. NASA Tech Briefs, 2013, 37(5): 56 – 57.
- [8] Pang H L J, Tan K H, Shi X Q, et al. Microstructure and intermetallic growth effects on shear and fatigue strength of solder joints subjected to thermal cycling aging[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 307(1): 42 – 50.
- [9] 李志民. 焊点的质量与可靠性 [J]. 信息技术与标准化, 2004(8): 29 – 30.
Li Zhimin. Quality and reliability of solder joint[J]. Information Technology and Standardization, 2004(8): 29 – 30.
- [10] 陈柳, 沈超, 郁佳萍, 等. 焊膏涂覆工艺选择对 CCGA 焊接可靠性的影响研究 [J]. 电子元件与材料, 2019, 38(6): 100 – 106.
Chen Liu, Shen Chao, Yu Jiaping, et al. Effects of solder printing technology for CCGA device assembly reliability[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(6): 100 – 106.

第一作者:南旭惊, 硕士; 主要从事微电子焊接、固相焊接技术研究; Email: nanxujing@mail.nwpu.edu.cn.

(编辑: 杨婉春)