

FCBGA 器件 SnAgCu 焊点的热冲击可靠性分析

姜 楠¹, 张 亮^{1,2}, 刘志权², 熊明月¹, 龙伟民³

(1. 江苏师范大学, 徐州 221116; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;

3. 郑州机械研究所 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州 450001)

摘 要: 采用有限元法和 Garofalo-Arrhenius 稳态本构方程, 在热冲击条件下对倒装芯片球栅阵列封装 (FCBGA) 器件 SnAgCu 焊点的可靠性进行分析. 结果表明, Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的可靠性相对较高. 通过分析 SnAgCu 焊点的力学本构行为, 发现焊点应力的最大值出现在焊点与芯片接触的阵列拐角处. 随着时间的推移, SnAgCu 焊点的应力呈周期性变化. Sn3.9Ag0.6Cu 的焊点应力和蠕变最小, Sn3.8Ag0.7Cu 焊点应力和蠕变次之, Sn3.0Ag0.5Cu 焊点应力和蠕变最大, 与实际的 FCBGA 器件试验结果一致. 基于蠕变应变疲劳寿命预测方程预测三种 SnAgCu 焊点的疲劳寿命, 发现 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的疲劳寿命比 Sn3.0Ag0.5Cu 和 Sn3.8Ag0.7Cu 焊点的疲劳寿命高.

关键词: 有限元法; 热冲击; 焊点; 可靠性; 疲劳寿命

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400232

0 序 言

随着电子工业的快速发展, 电子产品逐渐向便携化、小型化转变. 为了满足人们的需要, 球栅阵列封装 (BGA, ball grid array) 技术应运而生. BGA 技术以高效率、信号传输延迟小、焊点尺寸小等优点, 成为现代封装技术的主流. 其中, 倒装芯片球栅阵列封装 (FCBGA, flip chip ball grid array) 属于 BGA 的一种, 主要应用于图形加速芯片或者高脚芯片组. 因其信号传输速度快、封装体积较小和可靠性高等独特的优点^[1], 成为现代封装技术的一个重要发展方向.

自欧盟颁布“禁铅令”以来, 关于运用 SnAgCu 系合金钎料代替 SnPb 钎料的研究变得炙手可热^[2], 电子封装的无铅化成为未来电子封装的一个基本趋势. 焊点失效是致使电子封装失效的主要原因, 因此关于焊点的可靠性需要进一步的研究. 而温度能改变焊点的微观组织和内应力, 是影响焊点失效的主要因素之一. 随着电子封装技术的快速发展, 倒装芯片球栅阵列封装技术面临着巨大的挑战. 目

前, 采用热保护方式来保持电子器件的环境温度^[3], 以保证电子产品在极端的条件下仍能可靠运行. 由于 FCBGA 器件微型化, 运用试验方法分析倒装芯片球栅阵列封装器件的可靠性很困难. 而通过建立 FCBGA 器件模型, 对其进行有限元分析, 可以有效分析 FCBGA 器件的可靠性.

文中在热冲击条件下对 FCBGA 器件 SnAgCu 焊点进行有限元分析. 通过 ANSYS 软件模拟三种不同材料的 SnAgCu 焊点, 观察焊点的应力-应变和蠕变情况, 并基于蠕变-应变-疲劳寿命预测方程预测焊点的疲劳寿命, 得出较为可靠的 SnAgCu 焊点.

1 模型的建立和参数的选择

1.1 模型的建立

选择焊点呈 6×6 阵列排布的 FCBGA 器件为研究对象, 考虑到其它结构对 FCBGA 器件的可靠性影响较小, 因此所建立的 FCBGA 器件有限元模型可以简化为焊点、FR-4 基板、芯片三层结构^[4]. 因 FCBGA 器件具有对称性, 选择建立 FCBGA 器件 1/4 有限元模型. 选择基本单元类型为 3 维 20 节点固体结构单元 SOLID186, 采用扫略式网格划分方式. FCBGA 器件焊点直径为 0.4 mm, 焊点高

收稿日期: 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475220); 中国博士后科学基金资助项目 (2016M591464); 江苏省“六大人才高峰”资助项目 (XCL-022); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人计划资助

度为 0.28 mm, 中心间距为 0.6 mm, FR-4 基板尺寸为 10 mm × 10 mm × 1.2 mm, 芯片尺寸为 5.5 mm × 5.5 mm × 1 mm. 图 1 是有限元模型, 焊点阵列网格模型如图 2 所示.

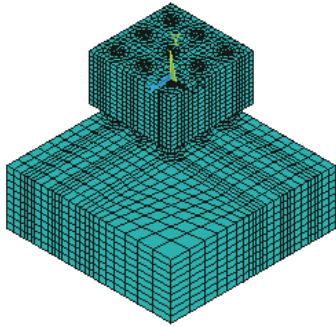


图 1 有限元模型
Fig. 1 Finite element model

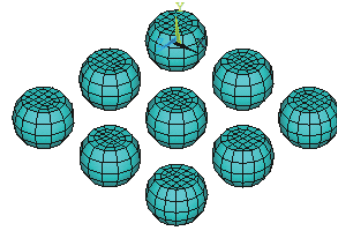


图 2 焊点阵列模型
Fig. 2 Array model of solder joints

1.2 参数的选择

考虑到芯片和基板两种材料性能受温度影响较小, 芯片和基板的材料属性视为线弹性材料. FCBGA 器件的材料各项参数如表 1 所示. SnAgCu 钎料的熔点约为 217 °C, 而在常温下 SnAgCu 焊点的归一化温度^[5]远远超过了 0.5 °C, 导致焊点的应力松弛和蠕变现象呈现地更加明显.

表 1 材料参数
Table 1 Parameters of materials

材料	杨氏模量 E/MPa	泊松比 μ	线膨胀系数 α _t /10 ⁻⁶ K ⁻¹	剪切模量(绝对温度) C ₁ /s ⁻¹	应力级数/剪切模量 C ₂ /MPa ⁻¹	应力指数 C ₃	激活能/玻尔兹曼 常数C ₄ /K
芯片	163 000	0.28	2.5	—	—	—	—
基板	16 000	0.28	16	—	—	—	—
Sn3.0Ag0.5Cu	38 700	0.35	25.0	461 000	0.037	6.17	8 400
Sn3.8Ag0.7Cu	39 000	0.35	25.0	325 000	0.052 17	5.3	5 800
Sn3.9Ag0.6Cu	74 840	0.35	16.66	441 000	0.005	4.2	5 412

在研究焊点蠕变过程, 使用 Garofalo-Arrhenius 稳态本构方程表述焊点应力和蠕变之间的关系^[6-7], 即

$$\frac{dy}{dt} = C \left(\frac{G}{T} \right) \left[\sinh \left(\omega \frac{\tau}{G} \right) \right]^n \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right) \quad (1)$$

式中: dy/dt 为蠕变剪切应变的速率; C 为材料常数; G 为与温度相关的剪切模量; T 为绝对温度; ω 为应力级数; τ 为剪切应力; n 为应力指数; Q 为激活能; R 为玻尔兹曼常数.

钎料遵循 Mises 准则, 因此式 (1) 可以转化为

$$\dot{\epsilon} = C_1 [\sinh(C_2 \sigma)]^{C_3} \exp \left(- \frac{C_4}{T} \right) \quad (2)$$

式中: C₁ ~ C₄ 的参数分别为^[8] C₁ = C(G/T); C₂ = ω/G; σ 为等效应力; C₃ = n; C₄ = Q/R; ε̇ 为等效蠕变应变速率.

1.3 载荷的施加

对 FCBGA 器件模型的基板中心点施加 0 位移

约束, 在 x-y 面上对 z 方向施加 0 位移约束, 在 y-z 面上对 x 方向施加 0 位移约束^[9-10]. 温度加载采用热冲击载荷, 温度范围为 -25 ~ 125 °C, 一个循环时间为 60 min, 进行 3 个循环. 热冲击温度循环曲线如图 3 所示.

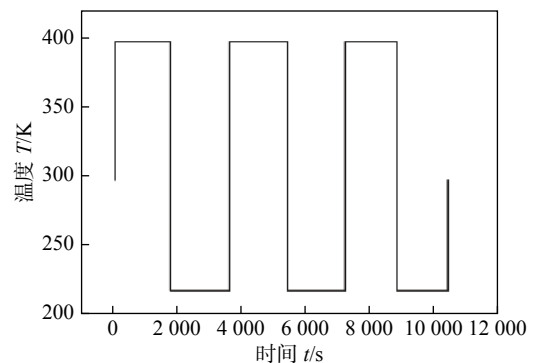


图 3 热冲击温度曲线
Fig. 3 Temperature curve of thermal shock

2 模拟结果和分析

图 4 为 SnAgCu 焊点冯米塞斯 (Von mises) 应力分布,从阵列中心处沿对角线观察,可以明显看出焊点应力逐渐增大,最大值出现在焊点与芯片接触的阵列拐角处.因此,选取拐角处的焊点作为有限元模拟的对象来分析三种 SnAgCu 焊点的可靠性.

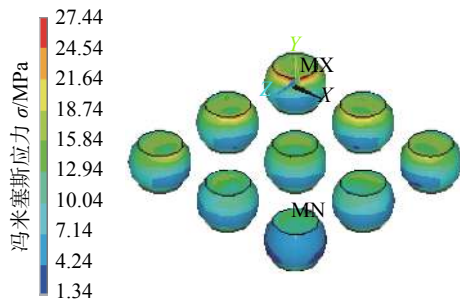


图 4 SnAgCu 焊点 Von mises 应力分布
Fig. 4 Stress distribution of SnAgCu solder

图 5 是 SnAgCu 焊点应力随时间变化曲线,可以看出 Sn3.0Ag0.5Cu 焊点的应力最大,Sn3.8Ag0.7Cu 焊点的应力次之,Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的应力最小.随着时间的变化,SnAgCu 焊点的应力呈现周期性变化,而且焊点的最小值与最大值之间有明显的差距,致使焊点容易发生断裂失效.

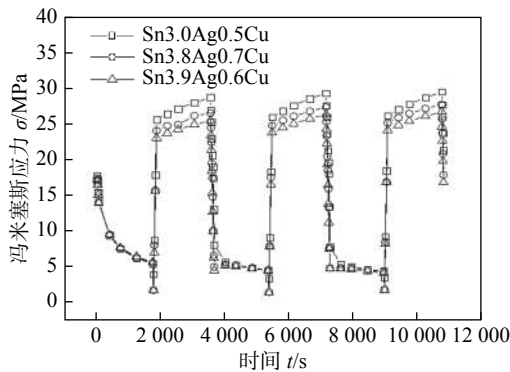


图 5 应力随时间变化曲线
Fig. 5 Time variation curve of stress

图 6 是 SnAgCu 焊点等效蠕变曲线,可以看出随着时间的增加,等效蠕变曲线有累积迭加的趋势.因此,焊点内部的蠕变变形随着热冲击次数的增加,从而导致焊点疲劳失效. Sn3.9Ag0.6Cu 焊点蠕变最小,Sn3.8Ag0.7Cu 焊点次之,Sn3.0Ag0.5Cu 焊点最大,表明焊点材料为 Sn3.9Ag0.6Cu 的焊点可靠性相对较高.

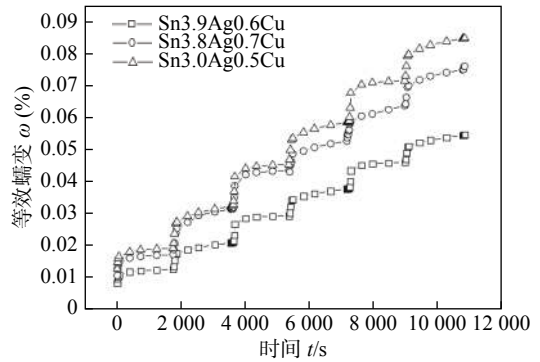


图 6 等效蠕变曲线
Fig. 6 Equivalent Creep Strain

通过有限元模拟的结果和焊点疲劳寿命的预测方程能预测出焊点的疲劳寿命,根据稳态本构方程 Garofalo-Arrhenius 的计算结果,基于蠕变应变疲劳寿命预测方程为^[11-13]

$$N_f = 1 / (0.040 5 \varepsilon_{acc}) \quad (3)$$

式中: ε_{acc} 是单一循环的蠕变应变.

三种 SnAgCu 焊点单一循环的蠕变值以及运用蠕变应变疲劳寿命预测方程计算出的焊点疲劳寿命如表 2 所示,预测出 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的疲劳寿命为 932 次,Sn3.8Ag0.7Cu 焊点的疲劳寿命为 871 次,Sn3.0Ag0.5Cu 焊点的疲劳寿命为 857 次,这可能是由于 Ag 含量增加导致焊点内部存在较多 Ag_3Sn 颗粒^[14-15],增加了焊点的强度,从而提高了焊点的疲劳寿命.

表 2 SnAgCu 焊点单一循环的蠕变和疲劳寿命
Table 2 Creep of single cycle of SnAgCu solder joints

材料	单一循环的蠕变 $\varepsilon_{acc}(\%)$	疲劳寿命 $N_f(\text{次})$
Sn3.0Ag0.5Cu	0.028 795	857
Sn3.8Ag0.7Cu	0.028 321	871
Sn3.9Ag0.6Cu	0.026 489	932

3 结 论

(1) 在热冲击条件下,FCBGA 器件 SnAgCu 焊点应力的最大值出现在焊点与芯片接触的阵列拐角处.

(2) 对 SnAgCu 焊点进行应力和蠕变分析,发现 Sn3.9Ag0.6Cu 的焊点应力和蠕变最小,Sn3.8Ag0.7Cu 焊点次之,Sn3.0Ag0.5Cu 焊点最大,表明 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的可靠性相对较高.

(3) 运用蠕变应变疲劳寿命预测方程来预测焊

点疲劳寿命, 结果表明 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点的疲劳寿命最大, Sn3.8Ag0.7Cu 焊点次之, Sn3.0Ag0.5Cu 焊点最小, 说明焊点材料为 Sn3.9Ag0.6Cu 的可靠性相对较高。

参考文献:

- [1] 皋利利, 薛松柏, 张 亮, 等. FCBGA 元器件焊点可靠性的有限元分析 [J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 73 – 76.
Gao Lili, Xue Songbai, Zhang Liang, *et al.* Finite element analysis of solder joint reliability of FCBGA components[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(8): 73 – 76.
- [2] 张 亮, 薛松柏, 韩宗杰, 等. FCBGA 器件 SnAgCu 焊点疲劳寿命预测 [J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 85 – 88.
Zhang Liang, Xue Songbai, Han Zongjie, *et al.* FCBGA device SnAgCu solder joint fatigue life prediction[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2008, 29(7): 85 – 88.
- [3] 田茹玉, 王晨曦, 田艳红, 等. 极限温度下 CBGA 焊点热冲击疲劳寿命预测 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 93 – 97.
Tian Ruyun, Wang Chenxi, Tian Yanhong, *et al.* Prediction of thermal shock fatigue life of CBGA solder joints at limit temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 93 – 97.
- [4] 张 亮, K N TU, 陈信文, 等. 近十年中国无铅钎料研究进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 767 – 790.
Zhang Liang, K N TU, Chen Xinwen, *et al.* Research progress of lead-free solders in China in the past decade[J]. China Science: Technical Science, 2016, 46(8): 767 – 790.
- [5] 薛松柏, 张 亮, 禹胜林, 等. 不同尺寸对 FCBGA 元器件焊点可靠性有限元分析 [J]. 江苏科技大学学报, 2007, 21(6): 13 – 16.
Xue Songbai, Zhang Liang, Yu Shenglin, *et al.* Finite element analysis of solder joint reliability of FCBGA components with different sizes[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2007, 21(6): 13 – 16.
- [6] 熊明月, 张 亮, 刘志权, 等. 基于田口法的 CSP 器件结构优化设计 [J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 51 – 54.
Xiong Mingyue, Zhang Liang, Liu Zhiquan, *et al.* Structural optimization design of CSP devices based on Taguchi method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 51 – 54.
- [7] 薛松柏, 胡永芳, 禹胜林. BGA 封装器件焊点抗剪强度的试验 [J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 62 – 64.
Xue Songbai, Hu Yongfang, Yu Shenglin. BGA package device solder joint shear strength test[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 62 – 64.
- [8] Zhang L, Han J G, Guo Y H, *et al.* Creep behavior of SnAgCu solders containing nano -Al particles[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2015, 26(6): 1 – 6.
- [9] 张 亮, 薛松柏, 卢方焱, 等. 不同钎料 QFP 焊点可靠性影响的有限元分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 45 – 48.
Zhang Liang, Xue Songbai, Lu Fangyan, *et al.* Finite element analysis of reliability of QFP solder joints with different solders[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 45 – 48.
- [10] Liu B, Wang M X, Lin T H, *et al.* Finite element stress analysis by packaging process simulation in a stacked chip scale package[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2005, 130: 49 – 54.
- [11] 张 亮, 韩继光, 郭永环, 等. WLCSP 器件 Sn3.9Ag0.6Cu 焊点疲劳寿命预测 [J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 97 – 100.
Zhang Liang, Han Jiguang, Guo Yonghuan, *et al.* Fatigue life prediction of Sn3.9Ag0.6Cu solder joint of WLCSP device[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 97 – 100.
- [12] Zhang X W, Cui C Q, Chan K C, *et al.* Analysis of solder joint reliability in flip packages[J]. International Microelectronics and Packaging Society, 2002, 25(1): 147 – 159.
- [13] Tee T Y, Ng H S, Zhong Z W. Board level solder joint reliability analysis of stacked die mixed flip-chip and wirebond BGA[J]. Micro-electronics Reliability, 2006, 46: 2131 – 2138.
- [14] 孙 磊, 陈明和, 张 亮, 等. Sn-Ag-Cu 钎料焊接显微组织演化及性能研究 [J]. 金属学报, 2017, 53(5): 615 – 621.
Sun Lei, Chen Minghe, Zhang Liang, *et al.* Microstructure evolution and properties of Sn-Ag-Cu solder[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(5): 615 – 621.
- [15] Zhang Q K, Zhang Z F. In-situ observations on fracture behaviors of Cu-Sn IMC layers induced by deformation of Cu substrates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 452 – 461.

第一作者简介: 姜楠, 男, 1996 年出生, 硕士研究生. 主要从事微电子封装材料与工艺、焊点可靠性的研究. 发表论文 1 篇. Email: 1319522136@qq.com

通信作者简介: 张亮, 男, 博士, 教授. Email: zhangliang@jsnu.edu.cn