

PBGA 封装焊点寿命影响因素的有限元分析

陈颖, 康锐

(北京航空航天大学 可靠性工程研究所, 北京 100083)

摘要: 为明确 PBGA 焊点设计及环境温度参数对其可靠性影响, 利用有限元软件 ANSYS 分析了温度循环、焊点材料、焊点高度与直径、PCB 板的厚度、刚度、热膨胀系数 (*CTE*) 对焊点寿命的影响。焊点采用了 Anand 本构关系描述, 寿命预测采用 Darveaux 模型。研究表明, 温度循环的范围变大焊点寿命变短, 保温时间缩短能增加焊点寿命; 经过优化的焊球, 寿命会增加; PCB 板越厚, 焊点寿命越短; PCB 板的杨氏模量越大, 焊点寿命越长。

关键词: 塑封球栅阵列封装; 焊点; 寿命; 影响因素; 有限元

中图分类号: TN305.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2008) 07-0563-04

Study on Lifetime Impact Factors of Solder Joint in PBGA Packaging

Chen Ying, Kang Rui

(Institute of Reliability Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to clarify the impact of design and environment temperature on PBGA solder joint reliability, effect of temperature, solder material, height, diameter and gap of solder joint, thick, elastic module and *CTE* of PCB on solder joint lifetime were analyzed by FEA software ANSYS. Anand constitutive relation, Darveaux lifetime estimation model were utilized in the analysis. The results show that increase of the temperature scope, lifetime of solder joint will decrease. Increase dwell times will improved solder joint lifetime. Optimization of solder joint configuration will increase its lifetime. The thicker the PCB plate is, the shorter the lifetime is; the bigger young modulus is, the longer the lifetime is.

Key words: PBGA packaging; solder joint; lifetime; impact factors; FEA

EEACC: 2530D

0 引言

新型的球栅阵列封装 (ball grid array, BGA)、芯片尺寸封装 (chip scale package, CSP) 的出现使得电子设备微型化、集成化程度大大提高。在 BGA 封装中, 以塑料环氧模塑混合物作为密封材料的塑封球栅阵列封装 (PBGA) 由于价格低、电性能良好而被广泛采用。焊点作为电子封装中重要的部分, 其可靠性成为研究和关注的焦点, 由于封装各部分热膨胀系数 *CTE* 的不匹配造成的焊点寿命问题尤为突出^[1]。出于提高生产效率的要求, 电子产品的研发周期缩短、成本不断降低, 而对研发出的产品质量要求越来越高^[2]。另一方面, 由于电子器件的结构非常复杂, 每个设计因素之间互相关

联, 使得其可靠性更难保证^[2]。因此, 在封装的设计阶段, 综合分析各种因素对焊点寿命的影响, 改善焊点的热疲劳状况, 成为保证电子产品可靠性寿命的重要环节。

已有文献对影响焊点寿命的参数进行了研究。H. Y. Qi 等人^[3]研究了 PCB 材料对无铅焊点寿命的影响, 结果表明, 聚酰亚胺板比 FR4 板的焊点寿命高。X. S. Liu 等人^[4]采用加速温度循环试验的方法研究了基板的刚度对倒装焊点寿命的影响, 证明柔性基板上的焊点热疲劳寿命比刚性基板上的要高。Q. Yu 等人^[2]利用了敏感性设计方法研究了 PBGA 封装的各个设计影响和联系因素对热疲劳寿命的影响。Y. M. Jen 等人^[5]利用有限元法研究芯片的数目对芯片球栅阵列封装下焊点热循环寿命的影响, 结果表明焊球的寿命随着芯片的数目增加而降低。

基金项目: 中国博士后基金资助项目 (20060400393)

利用有限元方法对 PBGA 封装焊点寿命进行预测避免了耗时、高成本的寿命试验。ANSYS 软件提供了焊点粘塑性 Anand 本构关系, 因此广泛应用于焊点寿命预测中。本文利用 ANSYS 分析环境温度变化、不同焊点材料、焊点的高度与直径以及 PCB 板的厚度、杨氏模量和热膨胀系数对焊点寿命的影响。

1 有限元模型

1.1 模型与材料

图 1 为 PBGA 封装的简化模型, 包括焊点、芯片、基板、塑封层、PCB 层四个部分。有限元计算中采用了图 1 的条形模型, 焊球采用三维粘塑性单元 Visco107 描述, 其他封装材料单元类型为 Solid45。表 1 为有限元计算中所用到的各种材料的材料参数^[9]。

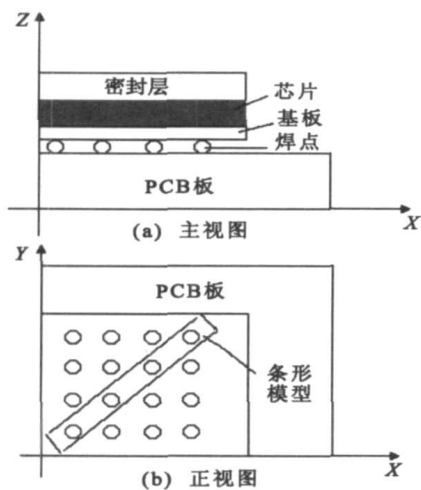


图 1 有限元计算采用的封装结构
Fig 1 Packaging structure in FEA

表 1 材料参数

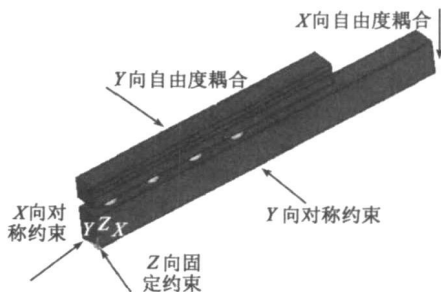
Tab 1 Material parameters

结构	E/GPa	CTE/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	ν
密封层	15.5	1.5	0.25
芯片(Si)	168.9	2.6	0.361 5
基板	26	15	0.22
PCB(FR4)	22	18	0.28
焊点	30	24.5	0.35

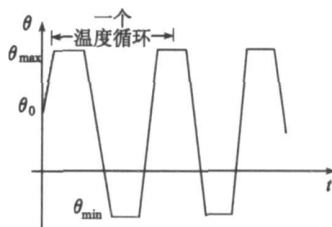
1.2 施加载荷

载荷包括两种, 其一为边界条件, 二为环境温度载荷。图 2 (a) 给出了条形模型下结构应施加的边界条件。其中包括对称边界条件, 中间面位移

耦合边界条件, 原点 Z 向约束条件等。这些条件模拟了封装中焊点的实际使用环境。环境温度载荷如图 2 (b) 所示, 从 θ_0 开始 (一般为 25 °C), 快速升高到最高温度 θ_{max} , 而后进入循环, 本文计算了两个温度循环。



(a) 边界条件



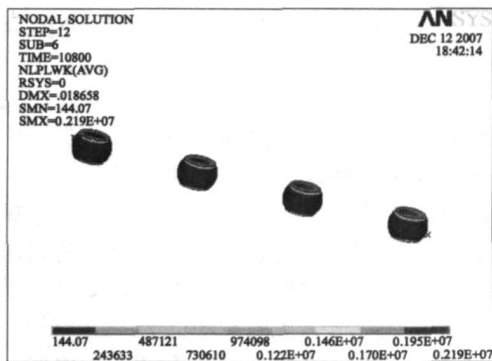
(b) 环境温度载荷

图 2 有限元计算中的载荷

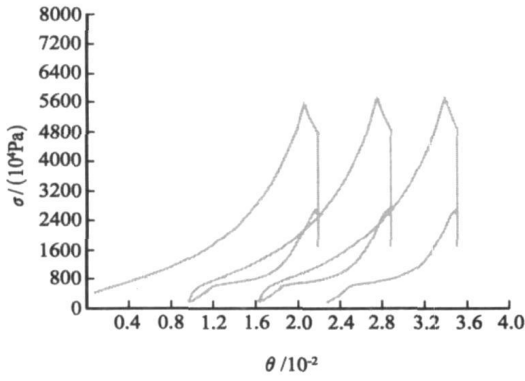
Fig 2 Loads in FEA

1.3 后处理

有限元计算后可以得到等效应力应变、剪切应力应变、塑性功、焊点累计蠕变应变云图及这些参数随着时间的变化。如图 3 (a) 所示为焊点塑性功云图, 3 (b) 为危险焊点等效应力-应变曲线, σ 为等效应力, θ 为等效应变。利用焊点塑性功云图可以确定危险焊点位置。通过 ANSYS 的后处理器直接提取危险焊点厚 0.025 4 mm 的两层单元的应变能密度, 根据 Darveaux 寿命模型计算焊点寿命。



(a) 焊点塑性功云图



(b) 危险焊点等效应变-等效应力迟滞回线

图3 有限元后计算结果
Fig 3 Results of FEA

2 焊点寿命影响因素分析

2.1 环境温度变化

温度循环的影响包括温度上下限以及温度上升、下降速度、温度保持时间 (t_m) 等。表 2 为有限元计算中温度循环参数的取值及寿命比较。表 2

验证了温度循环的温度范围变大, 焊点寿命变短这一结论。同时还能看出, 增加保温时间焊点寿命缩短, 原因可能是保温过程中积累了更多的蠕变应变, 加速了焊点的损伤。升降温的速度加快使得焊点寿命 N_f 缩短。

表 2 温度循环参数的取值与计算结果

Tab 2 Temperature cycle parameters and results

$\theta_{max}/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{min}/^{\circ}\text{C}$	t_{id}/min	t_m/min	$N_f/\text{循环次数}$
-40	125	15	15	1 375
-55	125	15	15	1 262
-40	85	15	15	1 986
0	70	15	15	5 031
-40	125	15	5	1 476
-40	125	15	10	1 414
-40	125	5	15	1 188
-40	125	10	15	1 303

2.2 焊点材料

加载条件为升降温时间 (t_{id}) 为 5 min, 高低温保持时间为 15 min。在其他条件相同时, 比较各种焊点的疲劳寿命。计算结果如表 3 所示。

表 3 焊点材料参数及各种材料对焊点的寿命影响

Tab 3 Material parameters and their impact on solder joint lifetime

焊料	S_0/MPa	$(Q/R)/(1\cdot\text{K}^{-1})$	$A/(1\cdot\text{s}^{-1})$	ζ	m	h_0/MPa	S/MPa	n	α	$N_f/\text{循环次数}$
60Sn40Pb	56.33	10 830	1.49×10^7	11	0.303	2 641	80.42	0.023	1.34	1 157
62Sn36Pb2Ag	42.32	11 262	2.3×10^7	11	0.303	4 121	80.79	0.021	1.38	1 212
96.5Pb3.5Sn	39.09	8 900	2.23×10^4	6	0.182	3 321	73.81	0.018	1.82	997
97.5Pb2.5Sn	15.09	15 583	3.3×10^{12}	7	1.143	1 787	72.73	0.004	3.73	3 091
95.5Sn3.8Ag0.7Cu	22.64	7 619	107.65	59.4	4.030	9 002	86.28	0.005	1.30	1 760

由计算结果可见, 含铅焊点中寿命比较长的是 97.5Pb2.5Sn, 无铅焊点 95.5Sn3.8Ag0.7Cu 的寿命高于 60Sn40Pb、62Sn36Pb2Ag 和 96.5Pb3.5Sn。

2.3 焊点尺寸

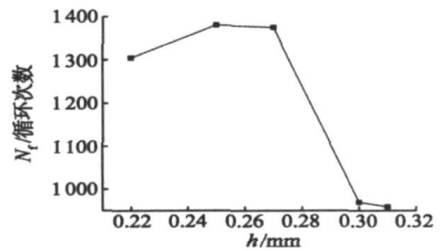
焊料选择 62Sn36Pb2Ag, 几何参数包括焊点的高度 (h)、直径 (d), 取值如表 4 所示, 其几何尺寸与寿命的影响见图 4。

表 4 焊点几何参数的取值

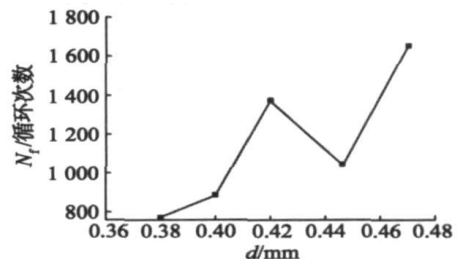
Tab 4 Solder joint parameters

参数	1	2	3	4	5
h/mm	0.22	0.25	0.27	0.3	0.31
d/mm	0.38	0.40	0.42	0.446	0.47

由图 4 可见, 在焊球直径一定的前提下, 焊点的高度并非单调上升或下降, 而是有个最佳值, 此时, 焊点寿命最大; 在焊球高度一定的条件下, 焊点的直径越大, 其寿命越高, 但焊点直径增加到一定值, 寿命反而减小, 之后又有所增加。计算结果表明, 优化焊点的形状与大小, 可改善焊点的寿命。



(a) 焊点的高度变化对其寿命的影响



(b) 焊点的直径变化对其寿命的影响

图 4 焊点几何尺寸与其寿命的关系

Fig 4 Relation of solder joint dimension with lifetime

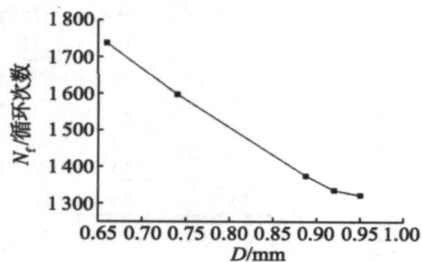
2.4 PCB 板参数

PCB 板厚度(D)、杨氏模量(E)、 CTE 如表 5 所示,其参数对焊球寿命的影响见图 5。

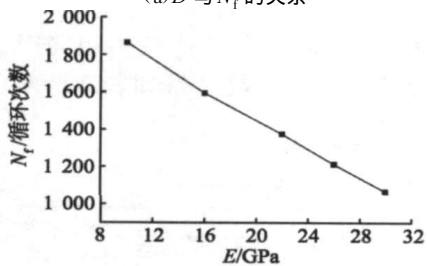
表 5 PCB 板参数的取值

Tab. 5 PCB parameters

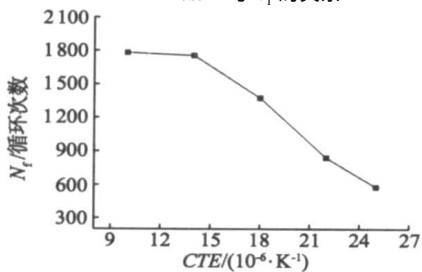
参数	1	2	3	4	5
D/mm	0.66	0.74	0.89	0.92	0.95
E/GPa	10	16	22	26	30
$CTE/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	10	14	18	22	25



(a) D 与 N_f 的关系



(b) E 与 N_f 的关系



(c) CTE 与 N_f 的关系

图 5 PCB 板参数对焊球寿命的影响

Fig. 5 Effect of PCB parameters on solder joint lifetime

由图 5 可见,PCB 板越厚,焊点寿命越短;PCB 板杨氏模量越大,焊点寿命越短。这与文献[7]的研究结果相吻合。PCB 板的 CTE 越大,焊点寿命越小;此规律是因为芯片和基板的平均 CTE 在 $5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 左右,如果 PCB 板的 CTE 越接近 $5 \times 10^{-6}/\text{K}$,焊点的寿命就会越长。

3 结语

利用有限元法分析了环境温度、焊点的材料、尺寸参数以及 PCB 板的材料、尺寸等对焊点寿命的影

响。结果表明:(1)温度循环幅度增加,焊点寿命变短。保温时间增加焊点寿命缩短,升降温的速度加快焊点寿命缩短。(2)四种材料的焊点中寿命比较长的是 97.5Pb2.5Sn,其次为 62Sn36Pb2Ag、60Sn40Pb 与 96.5Pb3.5Sn。(3)在焊球直径和高度对焊点寿命的影响不是单调的,通过优化可以达到最佳的寿命。(4)PCB 板越厚,焊点寿命越短;PCB 板的杨氏模量越大,焊点寿命越短。

参考文献:

- [1] XU C, CHEN G, MASAO S. Prediction of stress-strain relationship with an improved anand constitutive model for lead-free solder Sn-3.5Ag [J]. IEEE Trans on Components and Packaging Technology, 2005, 28(1): 111-116.
- [2] YU Q, SHIBUTANI T, JIN J C, et al. Easy reliability design approach for solder joint BGA package considering correlation of each design factor [C] // The 10th Intersociety Conf on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems. San Diego, USA, 2006; 900-905.
- [3] QI H Y, GANESAN S, WU J, et al. Effects of printed circuit board materials on lead-free interconnect durability [C] // 5th Int Conf on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics. Wroclaw, Poland, 2005; 140-144.
- [4] LIU X S, XU S Y, LU G Q, et al. Effect of substrate flexibility on solder joint reliability [J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(12): 1883-1891.
- [5] JEN Y M, WU Y L, FANG C K. Impact of the number of chips on the reliability of the solder balls for wire-bonded stacked-chip ball grid array packages [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(2/4): 386-399.
- [6] WANG G Z, CHENG Z N, BECKER K, et al. Applying Anand model to represent the viscoplastic deformation behavior of solder alloys [J]. ASME J Electronic Packaging, 2001, 123 (3): 247-253.
- [7] 陈颖. 焊点可靠性物理模型与寿命评估方法 [R]. 博士后工作报告. 北京航空航天大学. 2008. 36-37.

(收稿日期: 2008-03-14)



作者简介:

陈颖(1977—),女,河北丰润人,讲师,主要研究方向为电子产品失效物理、产品健壮设计等。