

基于稳健设计的 PBGA 器件焊点热机械疲劳可靠性的优化设计

周继承¹,肖小清^{1,2},恩云飞²,何小琦²

(1.中南大学物理科学与技术学院,湖南长沙 410083;2.信息产业部电子第五研究所,广东广州 510610)

摘 要: 基于稳健设计与有限元法,研究了加速热循环测试条件下塑封球栅阵列(PBGA)焊点的热机械疲劳可靠性.考虑 PCB 大小(A)、基板厚度(D)、芯片热膨胀系数(G)、焊点热膨胀系数(H)等八个控制因素,使用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 混合正交表,以对焊点热机械疲劳寿命的考核为目标,对 PBGA 焊点进行了优化设计.结果表明,影响焊点可靠性的显著性因素依次是基板热膨胀系数、焊点的热膨胀系数、基板厚度、芯片的热膨胀系数;最优方案组合为 A1B2C3D1E2F1G3H1.进一步的验证试验结果表明,与原始方案相比,该优化方案的最大等效应变降低了 66%,信噪比提高了 22.4%.

关键词: 塑封球栅阵列;热机械疲劳可靠性;稳健设计;有限元法

中图分类号: TN406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)11-2180-04

Optimal Design for Improving Thermo-Mechanical Fatigue Reliability of Solder Joint of PBGA Component Based on Robust Design

ZHOU Ji-cheng¹, XIAO Xiao-qing^{1,2}, EN Yun-fei², HE Xiao-qi²

(1. School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. China Cereprei Laboratories, Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: Based on robust design and Finite Element Method, the thermo-mechanical fatigue reliability of PBGA (Plastic Ball Grid Array) solder joint subject to an accelerated thermal cycling test condition is studied. Including PCB size, substrate thickness, chip coefficient of thermal expansion(CTE), and solder joint CTE et al., 8 different control factors are considered for a robust design towards enhancement of the thermal fatigue resistance of solder joint by using a $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ mixed-level orthogonal array. From the result, importance of these factors on the thermo-mechanical reliability of PBGA solder joint is ranked. The best parameter combinations is A1B2C3D1E2F1G3H1, which the substrate CTE, solder joint CTE, the thickness of substrate, die CTE are the most important. The optimal design, after further confirmative experiments, decreases the maximum equivalent strain by 66% and increases S/N by 22.4% compared to the original design.

Key words: plastic ball grid array; thermo-mechanical fatigue reliability; robust design; finite element method

1 引言

PBGA 器件具有重量轻、价格低廉,且耐热优良的优点,是球栅阵列型封装器件的主流. PBGA 器件焊点与周围材料的热膨胀系数(CTE)不匹配,最容易出现热机械疲劳现象,对整个器件可靠性的影响最大. PBGA 焊点可靠性成为微电子领域研究的热点之一.焊点的可靠性,除了受到焊点的材料、机械与热传导性质影响外,也与器件的其他部分几何形状有关.文献[1]利用全因子试验法对影响 PBGA 焊点可靠性的基板厚度、焊点排列方式、焊点间距和焊盘尺寸四个因素进行了优化设计;文献[2]利用正交试验法得出 PBGA 焊点的可靠性与样件规格、芯片配重等有关;文献[3~5]都得出了类似的结论.

本文将稳健设计方法与有限元模拟法相结合^[6,7],建立了一个 PBGA 的有限元三维模型,研究了不同控制因素对焊点可靠性的影响.同时,为提高焊点的热机械疲劳可靠性得出了基于 8 个控制因素的优化设计,提高

了器件整体的可靠性.

2 PBGA 焊点热机械疲劳可靠性试验设计

2.1 稳健设计技术

通常稳健设计利用正交表安排试验,并将信噪比引入优化过程中,最终得出不同因素对目标函数的影响程度.同时,通过验证试验确定优化结果的正确性,其过程如图 1.利用正交表安排试验,可以确保以最小数目的实验获得全因子试验中影响性能参数的全部信息^[2,8].采用正交表安排 PBGA 焊点热机械疲劳可靠性的有限元模拟,可减少模拟的次数,又能得到可靠的试验数据.

2.2 PBGA 焊点可靠性的影响因素

本文选取器件焊点部分的最大等效应变值(ϵ_{\max})作为衡量焊点可靠性的目标函数,其值越小越不容易被破坏.选取如表 1 所示的控制因素及其水平作为分析的重点,假设因素间不存在交互作用,采用混合正交表 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 安排 18 组模拟.

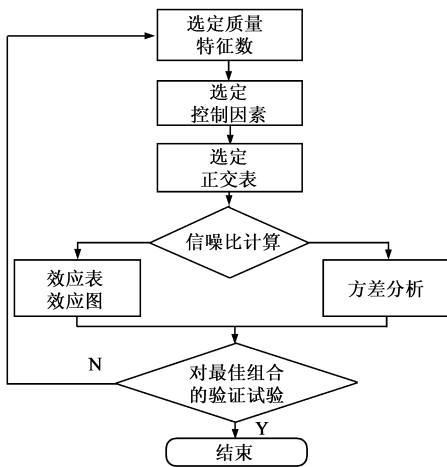


图 1 稳健设计流程图

表 1 因素及其水平配置表

因素	类型	水平 1	水平 2	水平 3
A	PCB 大小(mm)	18.0	15.0	
B	基板大小(mm)	13.0	13.5	14.0
C	PCB 厚度(mm)	1.40	1.57	1.80
D	基板厚度(mm)	0.40	0.56	0.70
E	PCB CTE($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.0	15.0	20.0
F	基板 CTE($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.0	15.5	20.0
G	芯片 CTE($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2/3*	原始值	4/3
H	焊点 CTE($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2/3	原始值	4/3

* 为原始值的 2/3, 以此类推.

2.3 PBGA 有限元模型的构建

参照 Amkor 公司提供的 PBGA272-1.27mm-27mm 的样片, 并根据样片对称性建立了有限元三维八分之一模型^[9], 如图 2. 焊点材料采用 Anand 模型^[8~10], 模压树脂采用麦斯威尔模型并配合 WLF 方程式输入参数, 其余部分均采用与温度相关的弹性材料参数. 表 2 中, 温度 $T_1 \sim T_4$ 分别代表 -40°C , 25°C , 50°C , 125°C .

热循环温度负载条件设定参照 IPC-9701^[11] 中提供的参考方案 TC3, 在 -40°C 到 125°C 之间循环. 并参考文献^[9] 的结论, 设定初始温度 25°C , 温度变化速率 $16.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 高低温停留时间均为 10min, 每次模拟进行 3 次循环. 基于给定的有限元模型, 用 ANSYS 模拟各种参数条件下的热循环试验, 得出模型中焊点的 ϵ_{max} .

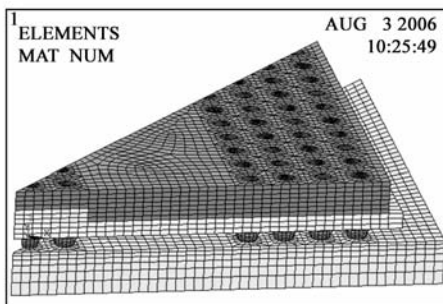


图 2 PBGA272 有限元模型

表 2 材料弹性属性^[12]

	$E(\text{GPa})$	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	ν
PCB	18.2	15.0	0.250
基板	223.0	$\alpha_x = \alpha_y = 15.5$	0.300
		$\alpha_z = 52.5$	
芯片	$E_{T1} = 192.1$	$\alpha_{T1} = 1.5$	0.278
	$E_{T2} = 191.0$	$\alpha_{T2} = 2.6$	
	$E_{T3} = 190.6$	$\alpha_{T3} = 2.8$	
	$E_{T4} = 190.0$	$\alpha_{T4} = 3.1$	
焊点	$E_{T1} = 46.9$	$\alpha_{T1} = 24.6$	$\nu_{T1} = 0.354$
	$E_{T2} = 43.3$	$\alpha_{T2} = \alpha_{T3} = 26.1$	$\nu_{T2} = 0.363$
	$E_{T3} = 41.3$	$\alpha_{T4} = 34.6$	$\nu_{T3} = 0.365$
	$E_{T4} = 34.6$		$\nu_{T4} = 0.384$

2.4 PBGA 焊点最大等效应变

根据混合正交表 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 的安排, 进行了 18 次模拟的加速热循环试验, 结果如表 3. 显然, 该方案大大减少了模拟试验次数. 18 次模拟相对于全因子至少需要 4374 次模拟已大为减少.

3 结果分析与因素优化

3.1 焊点最大等效应变的信噪比分析

利用信噪比作为目标函数, 将其与正交表结合, 可以解决许多不同特性值的综合功能评价. 因此, 为得到 A~H 八个控制因素对 ϵ_{max} 的影响效应, 本文将 ϵ_{max} 转化为信噪比.

由于采用模拟分析, 各组试验进行 n 次都会得到一样的数据. 所以各次试验值与试验平均值相等 $y_i = \bar{y}$, 试验的标准偏差 $\sigma = 0$, 故信噪比计算定义为:

表 3 试验结果与信噪比

试验	因素及其水平								ϵ_{max}	S/N
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.003614	48.84024
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.007719	42.24878
3	1	1	3	3	3	3	3	3	0.010877	39.26982
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.008724	41.18569
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.01049	39.58449
6	1	2	3	3	1	1	2	2	0.006011	44.42107
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.013607	37.32475
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.003367	49.45514
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.005634	4.98983
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.007887	42.06176
11	2	1	2	1	1	3	3	2	0.008262	41.6583
12	2	1	3	2	2	1	1	3	0.008389	41.5258
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.004292	47.34681
14	2	2	2	3	1	2	1	3	0.011211	39.00711
15	2	2	3	1	2	3	2	1	0.005693	44.89318
16	2	3	1	3	2	3	1	2	0.001383	37.18104
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.009305	40.62567
18	2	3	3	2	1	2	3	1	0.007488	42.51268
	均值									42.4518

$$S/N = -10\log y_i^2 \quad (1)$$

上式表明,在各组试验中, S/N 越高, ϵ_{\max} 越低,结果如表 3.

为计算出各因素对 S/N 的影响效应,将各因素同

表 4 各因素信噪比效应比较

	A	B	C	D	E	F	G	H
水平 1	143.03553	42.60078	42.32338	43.69882	42.29402	45.36912	41.85475	44.55791
水平 2	41.86804	42.73972	42.09658	41.75722	42.74827	42.00098	41.92920	42.97430
水平 3		42.01485	42.93540	41.89932	42.31306	39.98526	43.57140	39.82314
效应	1.167494	0.724869	0.838814	1.941599	0.454246	5.383856	1.716652	4.734775
排序	5	7	6	3	8	1	4	2
最优水平	A1	B2	C3	D1	E2	F1	G3	H1

从表 4 和图 3 可以得出各因素及其不同水平对最大等效应变的效应大小,其中影响较大的前四个因素分别为基板的 $CTE(F)$ 、焊点的 $CTE(H)$ 、基板的厚度(D)、芯片的 $CTE(G)$. 显然这结果与焊点热机械疲劳失效原因是其与周围材料热膨胀系数不匹配的理论相符. 同时我们还可以得到优化之后的最优参数组合为 A1B2C3D1E2F1G3H1,这与文献[3, 8]结论吻合.

3.2 可靠性影响因素的显著性分析

为确定各因素对焊点 ϵ_{\max} 的影响是否显著,给出了方差分析. 并将方差分析结果与试验误差作比较,以确定因素的效应是有足够的影响力,还是偶然造成的效应.

通过对试验数据进行方差分析,并采用 F 分布检验法考察八个因素对焊点可靠性影响是否显著,显著性的信心水准定为 99%,对那些无显著性的因素将其并入误差项,则可以得到如表 5 结果. 显然,基板的 $CTE(F)$ 和焊点的 $CTE(H)$ 是对焊点 ϵ_{\max} 影响最大的因素.

表 5 试验结果的方差分析

因素	偏差平方和	自由度	方差	F 分布值	信心水准(%)	显著性
A	6.13	1	6.13	1.45	74.37	否
B	1.78	2	0.89	0.13	11.97	否
C	2.26	2	1.13	0.24	20.30	否
D	14.06	2	7.03	1.60	75.37	否
E	0.79	2	0.40	0.03	2.94	否
F	88.79	2	44.39	9.23	99.68	是
G	11.30	2	5.65	1.46	19.15	否
H	69.71	2	34.86	7.25	99.23	是
误差	62.50	13	4.81			
总和	221.00	17				

3.3 优化结果验证

通过对 PBGA 焊点可靠性影响因素优化,我们得到了一个焊点热疲劳可靠性最高的 PBGA 器件. 下面将原始设计与最优设计进行比较.

水平的 S/N 取平均值,如表 4. 其中不同水平之间最大差值即为对 S/N 的影响效应. 根据表 4 可以得出相同因素不同水平信噪比效应比较结果,如图 3.

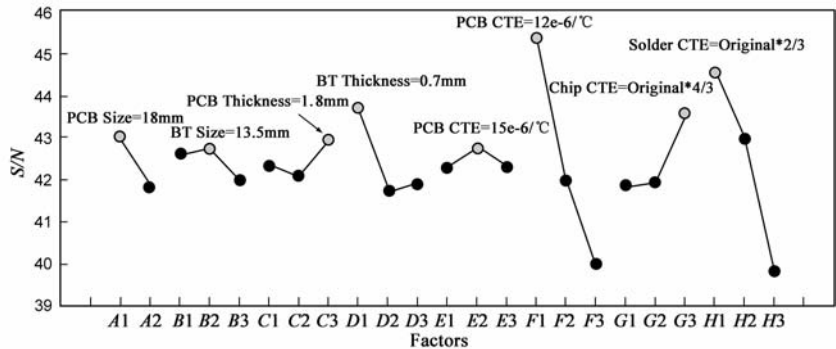


图 3 因素不同水平信噪比效应比较图

根据方差分析结果,只有 F 和 H 两个因素对焊点最大等效应变影响显著. 因此,在对原始设计和最优设计的信噪比进行预估计时,可以只考虑因素 F 和 H . 根据这一原则,原始设计信噪比的预估值计算公式为:

$$S/N = S/N_{Avg} + (S/N_{Avg} - S/N_{F2}) + (S/N_{Avg} - S/N_{H2}) \quad (2)$$

最优设计信噪比的预估值计算公式为:

$$S/N = S/N_{Avg} + (S/N_{Avg} - S/N_{F1}) + (S/N_{Avg} - S/N_{H1}) \quad (3)$$

其中 S/N_{Avg} 为 18 次模拟结果的信噪比均值; S/N_{F1} 为 F 因素水平 1 下所有试验信噪比均值,其它同,结果如表 6.

表 6 优化结果与验证试验结果比较

试 验	因素与及水平								ϵ_{\max}	试验 S/N	预估 S/N
	A	B	C	D	E	F	G	H			
原始设计	2	2	2	2	2	2	2	2	0.007705	42.2645	42.5235
最优设计	1	2	3	1	2	1	3	1	0.002592	51.7273	47.4752

根据统计理论^[5,7],可求出原始设计和最优设计的信噪比在 95% 信心水准下的信心区间:

$$CI = \left| N_{\alpha/2} \times \sigma \left(\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{r}} \right) \right| \quad (4)$$

其中 $N_{\alpha/2}$ 是 $\alpha = 0.05$ 的正态分布, m 为试验总次数与所计算预估值自由度的比值, r 为试验次数(计算预估值信心区间时, $1/r$ 取 0), σ 为误差项的标准偏差.

由式(4)得预估计值与验证试验值的信心区间分别为 2.2651 和 4.8581.

以上结果表明试验设计方案中所选影响因素之间

确实不存在交互作用,验证了方案的可行性.同时,根据最优设计建立的 PBGA 器件,其最大等效应变比值比原始设计降低了 66%,信噪比提高了 9.4627dB.

4 结论

(1)稳健设计与有限元法相结合的优化方法,增强了 PBGA 焊点的热机械疲劳可靠性,利用正交表安排试验大大减少了模拟次数,该方法是一种有效的优化设计方案.

(2)影响 PBGA 焊点可靠性的主要因素有基板的 $CTE(F)$ 、焊点的 $CTE(H)$ 、基板的厚度(D)、芯片的 $CTE(G)$,各影响因素间无交互作用,说明焊点热机械疲劳失效的主要原因是焊点与周围材料热膨胀系数不匹配.经过优化设计,其最优参数组合是 A1B2C3D1E2F1G3H1.

(3)优化设计之后的方案较原始方案有大的改进,其中最大等效应变降低了 66%,信噪比提高了 9.4627dB.

参考文献:

- [1] Syed, Ahmer R. Thermal fatigue reliability enhancement of plastic ball grid array (PBGA) packages[A]. Proceedings of the 46th Electronic Components & Technology Conference[C]. Orlando: IEEE, 1996. 1211 - 1216.
- [2] 黄春跃,等.基于正交试验设计的塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系研究[J].电子学报,2005,33(5): 787 - 792.
Huang Chun-yue, et al. Study on the relationship s between solder joint process parameters and reliability of plastic ball grid array component based on the orthogonal experiment design[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 787 - 792. (in Chinese)
- [3] 郭强,等.冲击载荷下航天用 PBGA 焊点的优化设计[J].电子元件与材料,2004,23(6):45 - 47.
Guo Qiang, et al. Optimization design of astronomic PBGA solder joint under shock load[J]. Electronic Components & Materials, 2004, 23(6): 45 - 47. (in Chinese)

- [4] Yang J H, Lee K Y. Application of a design of experiments approach to the reliability of a PBGA package[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2005, 17(3): 43 - 53.
- [5] Jong, W R, Chen S C, Chiu C C, et al. The geometrical effects of bumps on the fatigue life of flip-chip packages by Taguchi Method[J]. Reinforced Plastics and Composites, 2006, 25(1): 99 - 114.
- [6] Xu L, Tommi R, Wei R, Bo P W, et al. A simulation-based multi-objective design optimization of electronic packages under thermal cycling and bending[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(12): 1977 - 1983.
- [7] Lau J H, Chang C. Taguchi design of experiment for wafer bumping by stencil printing[J]. Electronics Packaging Manufacturing, 2000, 23(3): 219 - 225.
- [8] Mertol A. Application of the Taguchi method on the robust design of molded 225 plastic ball grid array packages[J]. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging, 1995, 18(4): 734 - 743.
- [9] Pang J H L, Seetoh C W, Wang Z P. CBGA solder joint reliability evaluation based on elastic-plastic-creep Analysis[J]. Electronic Packaging, 2000, 122(3): 255 - 261.
- [10] Syed A. Predicting Solder joint reliability for thermal, power, and bend cycle within 25% accuracy[A]. Michael Duncan. Proc 51st Electronic Components and Technology Conference[C]. Orlando: IEEE, 2001. 255 - 263.
- [11] IPC-9701, Performance test methods and qualification requirements for surface mount solder attachments[S].
- [12] Amagai A. Characterization of chip scale packaging materials[J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39(9): 1365 - 1377.

作者简介:

周继承 男,1963 年生于湖南长沙,教授,博士生导师.目前主要从事微纳电子材料与器件方面的应用基础研究.

E-mail: jicheng@mail.csu.edu.cn

肖小清 男,1982 年生于湖南衡阳,中南大学物理学院硕士研究生.研究方向主要为电子封装热机械疲劳可靠性.