

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

黄春跃^{1,2}, 周德俭², 吴兆华²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 桂林电子工业学院机电与交通工程系, 广西桂林 541004)

摘要: 基于正交试验设计法对塑封球栅阵列(PBGA)器件焊点工艺参数与可靠性关系进行了研究. 采用混合水平正交表 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 设计了 18 种不同工艺参数组合的 PBGA 测试样件, 进行了 546 小时、最大循环周数 2140 周的 PBGA 测试样件可靠性加速热循环试验. 基于试验结果进行了极差分析和方差分析; 研究了 PBGA 测试样件寿命的威布尔分布; 采用有限元分析方法对热循环加载条件下 PBGA 焊点内应力应变分布进行了研究. 试验结果表明失效焊点裂纹出现于焊点与芯片基板的交界面上. 研究结果表明: 样件规格对 PBGA 焊点可靠性有高度显著影响, 芯片配重对 PBGA 焊点可靠性有显著的影响, 焊盘直径和钢网厚度对 PBGA 焊点可靠性无显著影响; 最优工艺参数组合为: S2D2G2M1 和 S2D2G2M2. 有限元分析表明在热循环加载条件下 PBGA 器件内应力最大区域位于焊点与芯片基板的接触面上, 裂纹首先在焊点与芯片基板的接触面处产生. 有限元分析结果与试验结果相吻合.

关键词: 正交试验; 球栅阵列; 焊点; 工艺参数; 可靠性; 有限元分析

中图分类号: TN406; TG404 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 05 0788-05

Study on the Relationships between Solder Joint Process Parameters and Reliability of Plastic Ball Grid Array Component Based on the Orthogonal Experiment Design

HUANG Chun yue^{1,2}, ZHOU De jian², WU Zhao hua²

(1. School of ElectroMechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Dept. of Electronic Machinery and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The orthogonal experiment design method was applied to study the relationships between solder joint process parameters and reliability of plastic ball grid array (PBGA) component. By using a $L_{18}(2 \times 3^7)$ mixed level orthogonal array, the PBGA test vehicles which have 18 different process parameters' combinations were designed firstly, and then the accelerated thermal cycling test of PBGA test vehicles, which lasted 546 hours with 2140 cycles, was carried out subsequently. Based on the test results, the range analysis and the variance analysis were performed, the failure distribution of PBGA test vehicles was also characterized by using two parameter Weibull distribution, finally, the stress and strain distribution within the PBGA solder joint under thermal cycles were studied by finite element analysis. The thermal cycling test results show that the cracks of failure solder joints occur at the interface between the solder joints and the bismaleimide triazine (BT) substrate. The results of study show that specification size of PBGA component has a significant effect on the reliability of solder joints, the chip weight has a certain effect on the reliability, whereas the diameter of pad and the thickness of stencil have little effect on the reliability. The best combinations of process parameters are S2D2G2M1 and S2D2G2M2. The finite element analysis indicates that the maximum stresses of PBGA component under thermal cycles occur at the interface between the solder joint and the BT substrate. The solder joint cracks should be initiated at the interface and then propagate laterally through solder joint. The finite element analysis results are in good accord with the experimental results. Some results of this work have been applied in practice to assemble the PBGA component.

Key words: orthogonal experiment; ball grid array; solder joint; process parameters; reliability; finite element analysis

1 引言

塑料封装球栅阵列(PBGA: Plastic Ball Grid Array)器件是

现代电子产品中常用器件. PBGA 器件具有 I/O 端子数多、引脚间距大、分布引线电容、电感小、频率特性好等许多优点, 其应用和发展使表面组装技术进入了新阶段. PBGA 器件基板采

用双马来酰亚胺三氮杂苯(BT: Bismaleimide Triazine)树脂或聚酰亚胺, 钎料球组成为共晶钎料 63Sn/37Pb 或 62Sn/36Pb/2Ag, 封装时先用芯片粘接剂将芯片与基板粘接, 再用模压化合物对芯片进行密封, 最后将钎料球与基板上的金属焊台相连接形成钎料凸点, 钎料凸点以阵列方式排列即成 PBGA 封装器件。

以表面组装技术形成的 PBGA 器件与印制电路板(PCB: Printed Circuit Board)之间的连接焊点, 承担着电气连接与机械连接双重重任, 研究表明: 焊点质量与包含焊盘尺寸、钎料量、焊接工艺参数及焊点成形后的几何尺寸等在内的广义焊点形态参数直接相关^[1]。为此, 组装前的焊点相关参数合理设计, 对保证 PBGA 焊点质量显得尤为重要^[2,3]。本文基于正交实验设计方法, 以研究探讨 PBGA 焊点相关工艺参数与焊点可靠性之间关系为目的, 对多种不同阵列规格和工艺参数组合的 PBGA 测试样件进行了加速热循环试验、测试和对比分析, 给出了可供 PBGA 器件实际组装中工艺参数优化设计作参考的分析结果。

2 PBGA 焊点可靠性正交试验设计

2.1 正交试验设计技术

正交设计(orthogonal design)是多因子试验中最重要的一种设计方法。它是根据因子设计的分式原理, 采用由组合理论推导而成的正交表来安排设计试验, 并对结果进行统计分析的多因子试验方法^[4]。正交实验设计基于一定的规则设计正交表, 确保以最小数目的实验获得全因子实验中影响性能参数的全部信息。采用正交实验设计安排 PBGA 焊点可靠性试验可减少试验次数和成本, 只需在所有可能的 PBGA 工艺参数组合中挑选一小部分因子组合进行试验即可确保以最少数目的试验获得全部试验中影响性能参数的全部信息。

2.2 PBGA 测试样件设计

PBGA 测试样件采用 15mm×15mm、23mm×23mm 和 31mm×31mm 的三种焊点阵列规格的 PBGA 测试专用菊花链样件。根据 PBGA 焊接实际应用工艺, 选取影响 PBGA 焊点可靠性的四个关键因素为: PBGA 芯片配重 G 、焊盘直径 D 、钢网厚度 S 、样件规格 M 。分别选取以上四个因素的不同水平如表 1 所示(因素是指影响试验结果的原因, 水平是指试验中因素所设定的不同量或质的级别)。

表 1 PBGA 测试样件正交试验因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
芯片配重 G (g)	4.0784	15.0384	20.0284
焊盘直径 D (mm)	0.35	0.42	0.55
样件规格 M (mm)	15×15	23×23	31×31
钢网厚度 S (mm)	0.10	0.17	

根据以上所确定因素及各因素的水平, 不考虑因素间的相互作用, 采用混合水平正交试验设计, 选用混合水平正交表 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 如表 2 所示。根据表 2 共有 18 种工艺参数的组合, 即试验所需的 PBGA 测试样件至少为 18 件, 另外考虑重复试验样本, 每种工艺参数组合的 PBGA 测试样件数为 4 件, 则最后试验所需 PBGA 测试样件数为 72 件(18×4)。

表 2 PBGA 可靠性试验正交表与试验结果

试验号	S	D	G	M	空白列	空白列	空白列	空白列	失效率 y
1	1	1	1	1	3	2	2	2	0
2	1	2	1	2	1	1	1	1	0
3	1	3	1	3	2	3	3	3	3
4	1	1	2	3	2	1	1	2	1
5	1	2	2	1	3	3	3	1	0
6	1	3	2	2	1	2	2	3	0
7	1	1	3	3	1	3	2	1	2
8	1	2	3	1	2	2	1	3	0
9	1	3	3	2	3	1	3	2	0
10	2	1	1	1	1	1	3	3	0
11	2	2	1	2	2	3	2	2	0
12	2	3	1	3	3	2	1	1	3
13	2	1	2	2	3	3	1	3	0
14	2	2	2	3	1	2	3	2	0
15	2	3	2	1	2	1	2	1	0
16	2	1	3	2	2	2	3	1	0
17	2	2	3	3	3	1	2	3	2
18	2	3	3	1	1	3	1	2	0
失效总数									11

2.3 PBGA 可靠性试验测试系统设计

PBGA 可靠性加速热循环试验条件依据美国军标 MIL-STD 883 中的 1011.9, 温度范围 0℃~100℃, 每个周期为 920 秒, 升降温时间小于 10 秒, 每个周期中高、低温保温时间各为 450 秒。

根据标准 IPG 9701 的规定, PBGA 测试样件失效定义为:

(1) PBGA 测试样件焊点菊花链电阻阻值在热循环试验中增大超过 20%; (2) PBGA 测试样件焊点菊花链电阻阻值在热循环试验中变为无穷大(即 PBGA 测试样件菊花链中断)。

PBGA 测试样件试验测试系统如图 1 所示。系统分为微机控制、切换开关矩阵、数据采集和数据处理计算机四部分。数据采集由美国惠普公司的 HP34970A 数据采集/开关单元来完成。数据处理计算机对采集到的数据进行快速分析, 判断出所测量到的 PBGA 测试样件菊花链阻值是否超出标准规定。加速热循环可靠性试验所用设备为德国 Heanuas 公司生产的 HT-7012S3 温度循环试验箱。

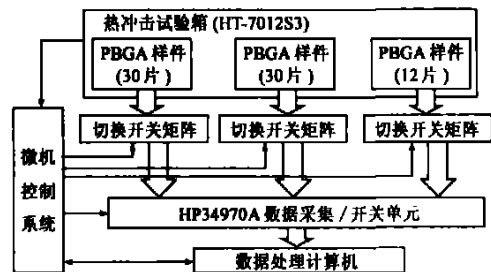


图 1 试验测试系统原理图

3 试验结果

PBGA 测试样件可靠性加速热循环试验总试验小时数约为 546 小时, 最大循环周次为 2140 周。PBGA 测试样件在试验

中的失效数为 11 件, 失效样件所对应的水平如表 2 所示. 图 2 是典型的有规则性失效 PBGA 测试样件菊花链电阻的变化趋势图, 该失效样件所对应的水平为: S1D1G2M3. 从图中可见 PBGA 测试样件菊花链阻值从热循环的第 1900 周左右开始明显增大, 超出了失效标准所规定的失效范围.

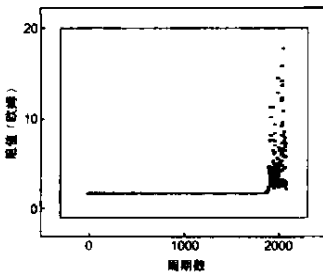


图 2 PBGA 测试样件菊花链电阻失效变化趋势图

图 3 为所示为 PBGA 测试样件失效焊点的金相分析图, 图中箭头所指处为焊点裂纹. 从图中可见, 裂纹出现于 BF 基板与共晶钎料球的交界面上, 图中的裂纹已经延伸扩展至基板与钎料球的整个交界面, 造成了焊点的失效.

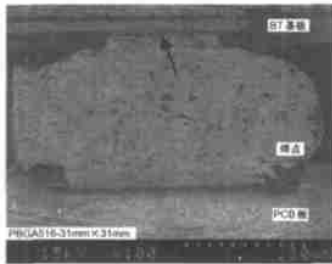


图 3 PBGA 测试样件失效焊点裂纹金相图

4 试验结果分析与讨论

4.1 PBGA 可靠性试验数据极差分析

利用极差分析方法计算出正交表表 2 中每列的极差 R 值, 从而可以解决以下两个问题: (1) 求最佳水平组合; (2) 求影响因素的主次顺序. 某个因素的极差定义为该因素最大水平均值与最小水平均值之差. 极差大表明该因素影响大, 是主要因素; 极差小说明该因素的影响小, 为次要因素. 极差分析的计算结果如表 3 所示.

表 3 极差分析结果表

	S	D	G	M
第一水平均值	0.6667	0.5	1	0
第二水平均值	0.5556	0.3333	0.1667	0
第三水平均值		1	0.6667	1.8333
极差 R	0.1111	0.6667	0.8333	1.8333
极差顺序	4	3	2	1

由表 3 可知极差大小顺序为: $R_M > R_G > R_D > R_S$. 即影响焊点可靠性因素的大小顺序为: 样件规格 M 影响最大, 其次是 PBGA 配重 G , 再次是焊盘直径 D , 最后是钢网厚度 S . 图 4 所示为各因子对焊点可靠性的影响, 从图 4 可以得出可靠性最高的 PBGA 测试样件最优的工艺参数组合为: S2D2G2M1 和 S2D2G2M2. 另外由图 4 也可见, 随着钢网厚度由 S1(0.10mm) 增加到 S2(0.17mm), 焊点的可靠性也有所提高. 由于

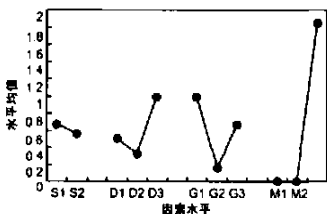


图 4 各因子对焊点可靠性的影响

钢网厚度的增加相应的提高了焊点高度, 这说明适当提高焊点的高度有利于提高焊点的可靠性寿命, 其原因在于焊点高度提高后可以更好的吸收由于 PBGA 器件材料热膨胀系数不匹配而产生的热变形, 从而提高了器件的可靠性.

4.2 PBGA 可靠性试验数据方差分析

表 3 是通过极差的大小来评价各因素对 PBGA 焊点可靠性影响的大小和顺序, 但为了考察极差要小到什么程度时方可认为该因素水平变化对可靠性无显著影响, 需要采用正交法的方差分析来对有关数据进行方差计算, 以得出方差因素水平的显著对比性.

根据有重复试验的正交试验数据的方差分析理论^[5], 可计算出各因素的偏差平方和 Q_i 、误差平方和 Q_E 、自由度 f_i 和方差估计值 S_i^2 , 即:

$$Q_i = \frac{1}{a_i r} \sum_{j=1}^{b_i} T_{ij}^2 - \frac{1}{nr} \left(\sum_{z=1}^n \sum_{k=1}^r y_{z,k} \right)^2 \quad (1)$$

式中 n 为正交表所安排的试验号, r 为每号试验重复次数, a_i 为第 i 列所安排因素的水平重复次数, b_i 为第 i 列所安排的因素的水平数, T_{ij} 为第 i 因素的第 j 个水平所做的 $a_i r$ 个试验结果之和, y_{zk} ($z = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, r$) 为所得试验结果.

$$Q_E = \sum Q_i + r \sum_{z=1}^n \sum_{k=1}^r (y_{z,k} - \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r y_{z,k})^2 \quad (2)$$

式中 Q_i 为某一个空白列的偏差平方和. 由于试验中只考虑了 4 个因素, 且没有考虑各因素之间的交互作用, 故正交表的第 5、6、7、8 列为空列, 将其作为误差列, Q_i 可按照式(1)计算.

$$f_i = b_i - 1 \quad (3)$$

$$Q_E \text{ 所对应的自由度 } f_E \text{ 为: } f_E = f_{E_1} + n(r-1) \quad (4)$$

式中 f_{E_1} 为所有空白列偏差平方和所对应的自由度之和.

$$S_i^2 = \frac{Q_i}{f_i} \quad (5)$$

$$S_E^2 = \frac{Q_E}{f_E} \quad (6)$$

$$\text{定义统计量 } F_i \text{ 为: } F_i = \frac{S_i^2}{S_E^2} \quad (7)$$

当 $F_{0.01}(f_i, f_E) > F_i \geq F_{0.05}(f_i, f_E)$ 时, i 因素是显著性因素, 当 $F_i \geq F_{0.01}(f_i, f_E)$ 时, i 因素是高度显著性因素, 如果 $F_i < F_{0.05}(f_i, f_E)$, 则因素是非显著性因素. $F_a(f_i, f_E)$ 的值由 F 分布表查得.

根据以上公式, 可计算出各因素的偏差平方和、自由度和方差估计值和 F 值(方差比)如表 4 所示.

表 4 PBGA 可靠性试验方差分析表

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	$F_{0.01}$	$F_{0.05}$	显著性
芯片配重 G	0.5278	2	0.2639	3.3575	4.983	15	显著
焊盘直径 D	0.3611	2	0.1806	2.2971	4.983	15	不显著
钢网厚度 S	0.0139	1	0.0139	0.1768	7.084	00	不显著
样件规格 M	3.3611	2	1.6806	21.3817	4.983	15	高度显著
误差	5.0277	64	0.0786				
总和	9.2916	71					

由表 4 可知, 在所考察的影响 PBGA 器件焊点可靠性的四个因素中, 样件规格 M 所对应的 F 值为 21.3817, 远大于 $F_{0.01}(2, 64)$ (即 4.98), 因此, 该因素对 PBGA 焊点可靠性具有高度显著的影响, 由此应选定与具有最少失效样件数目相对应的样件规格, 即可选取规格 $M1$ 或 $M2$; 芯片配重 G 所对应的 F 值为 3.3575, 该值大于 $F_{0.05}(2, 64)$ (即 3.15) 而小于 $F_{0.01}(2, 64)$ (即 4.98), 因此该因素对 PBGA 焊点可靠性也有显著的影响; 焊盘直径 D 和钢网厚度 S 的 F 值均小于 $F_{0.05}(2, 64)$, 说明这两个因素对 PBGA 焊点可靠性无显著影响。根据表 4 中所列出的四个因素的 F 值的大小, 可以得出四个因素显著性的排序为 $F_M > F_G > F_D > F_S$, 这与上述极差分析结果一致。

4.3 PBGA 测试样件失效分布

PBGA 测试样件的失效分布是指其失效概率密度函数或累积失效概率函数。大量实践证明凡是因某一局部失效或故障所引起的全局机能停止运行的元件、器件、设备、系统等的寿命服从威布尔分布^[6]。本文采用威布尔分布对 PBGA 测试样件可靠性试验数据进行统计分析。由于本次试验中失效的 PBGA 测试样件规格均为 $31\text{mm} \times 31\text{mm}$, 因此针对该规格的 PBGA 测试样件的失效进行威布尔分布统计分析。该规格的样件总数为 24 件, 试验中失效 11 件, 具体失效数据见表 5。

表 5 PBGA 测试样件失效数据 $31\text{mm} \times 31\text{mm}$

失效序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
失效周数	953	1153	1215	1360	1411	1758	1793	1875	1969	2097	2233
中位秩 (%)	2.87	6.97	11.07	15.16	19.26	23.36	27.46	31.56	35.66	39.75	43.85

对于两参数的威布尔分布, 其累积失效概率函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right], \quad t > 0 \quad (8)$$

形状参数 m 的估计值可由下式计算^[7]:

$$\hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

式中, $x_i = \ln t_i$, $y_i = \ln \ln \frac{n}{n-i}$, $\bar{x} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i$, $\bar{y} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln \ln \frac{n}{n-i}$, n 为样件数量, r 为失效件数, t_i 为第 i 件样件的失效周数。

尺度参数 η 的估计值可由下式计算:

$$\hat{\eta} = \exp(-\hat{a}/\hat{m}) \quad (10)$$

式中, $\hat{a} = \bar{y} - \hat{m}\bar{x}$ 。

根据以上公式和表 5 中的数据可求得 \hat{m} 为 3.074, η 为 2487.417。

则 PBGA 测试样件累积

失效概率函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{2487.417}\right)^{3.074}\right] \quad (11)$$

由式(11)可计算出规格为 $31\text{mm} \times 31\text{mm}$ 的 PBGA 测试样

件的中位寿命(可靠度和累积失效概率 $F(t)$ 都为 50% 时的寿命)为 2208 周。PBGA 测试样件寿命威布尔分布如图 5 所示。

5 PBGA 测试样件焊点应力应变有限元分析

5.1 PBGA 焊点失效机理分析

PBGA 焊点失效主要由热疲劳损伤引起, 即在温度循环载荷作用下, 由于 BT 基板、焊点及 PCB 板的热膨胀系数不匹配而导致焊点内部产生热应力应变, 从而导致焊点的热疲劳失效^[8]。热疲劳源于焊点服役过程中所必须承受的热循环, 如加电循环过程。PBGA 焊点失效机理是累积损伤机理, 是蠕变与疲劳机制损伤的复合累积。宏观上, 热疲劳损伤引起焊点裂纹, 并首先出现在远离焊点中心的角点处焊料与基板过渡区, 也即高应力点。然后逐渐沿焊料与基板界面扩展到整个焊点长度。微观上, 热疲劳断口表面既有疲劳条纹的特征, 又有晶界微空洞和蠕变沿晶断裂的痕迹^[9]。焊点的失效与焊料的性质及显微组织演变、循环温度及频率、最高温度保持时间、焊点质量等均有关。

5.2 PBGA 焊点应力应变有限元分析

了解 PBGA 焊点内部在热循环加载条件下的应力应变分布对于分析焊点失效机制有着重要意义。热循环加载条件下 PBGA 焊点内部应力应变分布可通过有限元分析方法获得。

PBGA 焊点应力应变有限元分析模型采用二维有限元分析模型, 划分为 16872 个节点, 5198 个单元。该模型所对应的水平为: S1D1G2M3。对 PBGA 焊点进行应力应变有限元分析采用的软件为 ANSYS, 有限元分析中采用的材料性能参数如表 6 所示。

表 6 PBGA 测试样件材料参数

材料名称	弹性模量 E (MPa)	泊松比	热膨胀系数 ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
塑封树脂	1.4×10^4	0.3	22
FR4 基板	1.1×10^4	0.28	15
Sr63Pb37	1.1×10^4	0.4	21

PBGA 焊点应力应变有限元分析结果如图 6 所示。图 6 所示为热循环试验第三周从 $+100^\circ\text{C}$ 降温至 0°C 时 PBGA 焊点内应力应变分布图。图 6(a) 所示为应力分布图, 图 6(b) 是同一时刻同一焊点内的应变分布图。由图 6 可见, PBGA 焊点内应力最大的区域位于焊点与 BT 基板的接触区域; 焊点内应力应变分布是不均匀的, 焊点与 BT 基板和焊点与 PCB 板的接触面均为高应力高应变区域, 是焊点的薄弱环节, 焊点的疲劳裂纹将优先在这两个区域产生。有限元分析结果可得出以下结论: 在热循环加载条件下, 裂纹首先在焊点与 BT 基板的接触面处产生, 随后沿着接触面延伸发展, 最终扩展到整个接

图 5 PBGA 测试样件寿命威布尔分布图

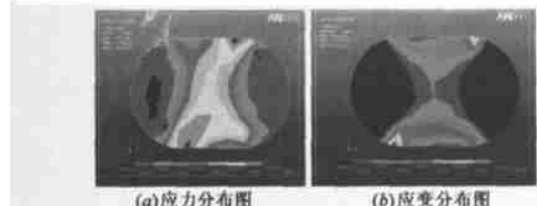
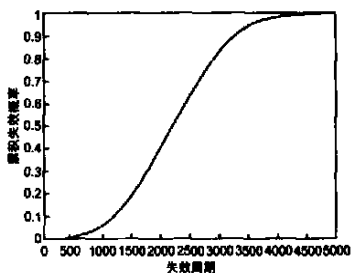


图 6 PBGA 焊点内应力应变分布图

触面,使焊点失效。

上述有限元分析结论可由图 3 所示 PBGA 测试样件失效焊点裂纹金相图所证实,有限元分析所显示的高应力应变区域与实际试验中焊点的裂纹起裂位置和扩展路径相吻合。

6 结论

通过以上分析和研究,可以得到以下几个基本结论:

(1) 正交试验设计方法能成功应用于 PBGA 器件焊点可靠性试验的工艺参数组合设计,可以减少试验所需样件数量,降低了试验成本。

(2) 基于试验结果的极差分析表明:影响 PBGA 焊点可靠性因素的大小顺序为:样件规格 M 影响最大,其次是 PBGA 配重 G ,再次是焊盘直径 D ,最后是钢网厚度 S ;本研究中最优的工艺参数组合为: $S2D2G2M1$ 和 $S2D2G2M2$ 。方差分析表明:因素样件规格对 PBGA 焊点可靠性具有高度显著的影响,因素芯片配重对 PBGA 焊点可靠性有显著的影响,因素焊盘直径和钢网厚度对 PBGA 焊点可靠性无显著影响。方差分析结果与极差分析结果一致。

(3) 规格为 $31\text{mm} \times 31\text{mm}$ 的 PBGA 测试样件寿命服从形状参数为 3.074,尺度参数为 2487.417 的威布尔分布,其中位寿命为 2208 周。

(4) PBGA 焊点应力应变有限元分析表明:PBGA 器件内应力最大的区域位于焊点与 BT 基板的接触面上;焊点内应力应变分布是不均匀的,焊点与 BT 基板和焊点与 PCB 板的接触面均为高应力高应变区域,是焊点的薄弱环节。在热循环加载条件下,裂纹首先在焊点与 BT 基板的接触面处产生,并沿着接触面延伸发展,最终扩展到整个接触面。有限元分析结果与试验结果相吻合。

参考文献:

[1] 周德俭,潘开林,吴兆华,等.基于最小能量原理的 SMT 焊点三维形态预测[J].电子学报,1999,29(5):66-68.

- [2] ZHOU D J, PAN K L, LIU CH K. The CAD study on the shape evlving and the thermal reliability of PBGA solder joint[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 1999, 19(1):69-74.
- [3] 周德俭,潘开林,刘常康. SMT 焊点形态成形和焊点可靠性 CAD [J]. 半导体学报,2000, 21(2):204-208.
- [4] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京:中国农业出版社,2002. 171-171.
- [5] 何少华,文竹青,姜涛. 试验设计与数据处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002. 97-98.
- [6] 刘品. 可靠性工程基础[M]. 北京:中国计量出版社,1995. 9-9.
- [7] 辛开远. 系统可靠性分析讲座(续二)[J]. 水力电力机械,2003, 25(12):58-60.
- [8] 刘常康,周德俭,潘开林,等. PBGA 焊点的热疲劳寿命分析[J]. 机械强度,1999, 21(3):212-214.
- [9] 周德俭. SMT 焊点形态理论及 CAD 技术研究[D]. 杭州:浙江大学,1998.

作者简介:



黄春跃 男,1971 年生于广西龙州,2001 年获桂林电子工业学院机械制造及其自动化专业硕士学位,现为西安电子科技大学机电工程学院博士研究生,研究方向为 SMT 焊点可靠性,已发表论文多篇. E-mail:hey@gliet.edu.cn.



周德俭 男,1954 年生于浙江金华,博士生导师,1990 年获西安电子科技大学机械制造专业硕士学位,1998 年获浙江大学机械制造及自动化专业博士学位,现为桂林电子工业学院机电与交通工程系教授,主要从事 SMT、CAD/CAM 方向的教学科研工作,已发表论文数十篇。