

底充胶叠层 PBGA 无铅焊点随机振动应力应变分析

黄春跃¹, 梁颖², 邵良滨¹, 黄伟¹, 李天明³

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541004; 2. 成都航空职业技术学院 电子工程系, 成都 610021;
3. 桂林航天工业学院 汽车与动力工程系, 桂林 541004)

摘要:建立了底充胶叠层塑料球栅阵列(plastic ball grid array, PBGA)无铅焊点三维有限元分析模型,研究了PBGA结构方式、焊点材料、底充胶弹性模量和密度对叠层无铅焊点随机振动应力应变的影响。结果表明,底充胶可有效降低焊点内的随机振动应力应变;在其它条件相同下,对于Sn95.5Ag3.8Cu0.7, Sn96.5Ag3Cu0.5, Sn-3.5Ag和Sn63Pb37这四种焊料,采用Sn-3.5Ag的底充胶叠层焊点内的随机振动最大应力应变最小,采用Sn96.5Ag3Cu0.5的焊点内的最大应力应变最大;随着底充胶弹性模量的增大,叠层无铅内的随机振动应力应变值相应减小;随着底充胶密度的增大,叠层无铅内的随机振动应力应变值相应增大。

关键词:叠层无铅焊点; 底充胶; 随机振动; 有限元分析; 应力应变

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)10-0033-04

0 序 言

为了提高倒装焊芯片焊点的热疲劳寿命,一是可以尽可能增加焊点高度^[1],二是可以在芯片下填充树脂^[2]。需要指出的是,单个焊料焊点的高度是受到限制的,若焊点太高,焊料熔化时自身重量就会大于收球的表面张力而使焊点坍塌。为解决这一问题,可采用叠层焊点^[3]的方式以使焊点高度大大增加,达到减小剪切应力的目的,从而大大提高焊点可靠性。

对于采用单层较小焊点的PBGA封装,底部填充树脂的操作难以进行,而当焊点采用叠层方式后,由于焊点高度的增加,将会易于进行底部填充底充胶的操作。针对叠层焊点,目前已有研究^[4-5]证实采用焊点堆叠设计提高焊点高度可以有效延长焊点热疲劳寿命,而对叠层焊点振动冲击可靠性尚未开展研究工作。研究表明,在某种情况下振动冲击所引起的疲劳失效甚至会成为焊点的主要失效原因^[6],振动冲击引起的焊点可靠性问题日益引起人们的重视。为确保叠层焊点在各种实际工作条件下的可靠应用,研究其在振动加载条件下的可靠性以及各种因素对其振动可靠性的影响,以确保叠层焊点在各种环境下可靠工作有其必要性。文中将增加

焊点高度和在芯片下填充树脂两种提高焊点可靠性的方式相结合,对随机振动条件下的底充胶叠层PBGA无铅焊点应力应变进行有限元分析,考察焊点材料参数变化和底充胶材料参数变化对叠层PBGA无铅焊点随机振动应力应变的影响,从而为提高随机振动条件下叠层PBGA无铅焊点的可靠性提供理论指导。

1 底充胶叠层 PBGA 无铅焊点随机振动应力应变有限元分析

1.1 底充胶叠层 PBGA 无铅焊点有限元分析模型

文中分析对象来源于TopLine公司生产的16×16全阵列PBGA产品,总共256个叠层无铅焊球,焊球间距1.0 mm。所建立的底充胶叠层无铅焊点三维有限元分析模型包括塑封体、芯片、粘结剂、叠层焊球、底充胶、焊盘和印制电路板(printed circuit board, PCB)七部分。PCB尺寸为40 mm×40 mm×1.6 mm,焊球直径0.6 mm,焊球高度0.45 mm,PBGA基板尺寸17 mm×17 mm×0.36 mm,芯片尺寸10 mm×10 mm×0.25 mm,塑封尺寸15 mm×15 mm×0.8 mm。所选取的叠层焊点材料为无铅焊料95.5Sn3.8Ag0.7Cu。

由于结构的对称性,为了节约求解时间,选取1/4结构进行分析,叠层焊点应力应变有限元分析1/4整体模型如图1所示。图1中显示出了整体有限元模型、去掉了底充胶的模型局部和单个叠层焊

点的有限元模型。有限元模型采用 SOLID185 单元，整个模型共划分为 429528 个单元、73521 个节点。有限元分析中采用的材料性能参数见表 1 所示。

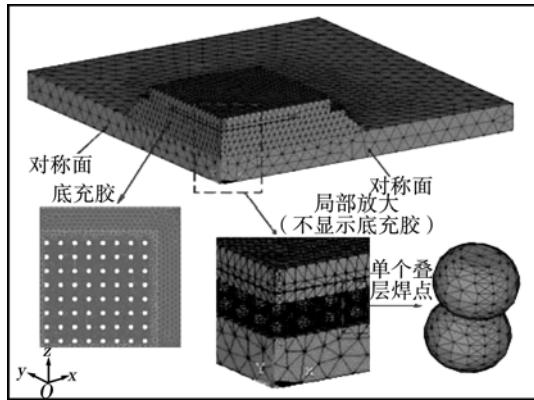


图 1 带底充胶叠层无铅焊点三维有限元分析模型

Fig. 1 Finite element model of PBGA package with underfill

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

材料名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
95.5Sn3.8Ag0.7Cu	47.01	0.40	7 300
芯片	130	0.28	2 320
FR-4	18.2	0.25	1 800
环氧树脂	15.5	0.25	1 800
BT 基板	22.3	0.3	1 200
粘结剂	38	0.3	1 200
底充胶 ^[7]	4.9	0.35	1 750

文中采用的随机激励的形式为加速度功率谱密度 (power spectral density, PSD)，来源于美国军用标准 MIL-STD NAVMAT P-9492。加速度功率谱曲线在随机振动频率在 20 ~ 80 Hz 时，曲线上升斜率为 +3dB/oct，对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.01 ~ 0.04 g²/Hz，80 Hz 时为 0.04 g²/Hz；当随机振动频率在 80 ~ 350 Hz 时，对应加速度功率谱密度幅值为 0.04 g²/Hz，当随机振动频率在 350 ~ 2 000 Hz 时，曲线以 -3dB/oct 的斜率下降，对应的加速度功率谱密度幅值范围为 0.04 ~ 0.01 g²/Hz。对有限元模型所施加的边界条件为：对称面施加对称边界条件，约束 PCB 底边最远端角点的 x, y 和 z 三个方向自由度。

1.2 底充胶叠层 PBGA 无铅焊点随机振动分析结果

采用范米塞斯等效应力应变(以下简称应力应变)描述底充胶叠层无铅焊点内部的应力应变分布

状态。底充胶叠层无铅焊点随机振动应力应变有限元分析结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 中可见，在整个焊点阵列中，焊点内的等效应力应变分布是不均匀的，从中心焊点到边缘焊点等效应力应变逐渐增加，外围叠层无铅焊点受到的应力应变要比位于中间部分的焊点的大，最大应力应变出现于距离 PCB 中心最远的角落处叠层无铅焊点上，最大应力和最大应变值分别为 1.41 MPa 和 2.83×10^{-5} ；出现最大应力应变的叠层无铅焊点两个端面(芯片一侧和 PCB 一侧)是应力集中区域，且都位于接触面的外边缘，芯片一侧的等效应力大于 PCB 一侧，因此，裂纹开始产生于该区域，然后沿叠层无铅焊点与封装体接合面发展，最终扩展到整个接合面，导致叠层无铅焊点失效，该叠层无铅焊点即为关键叠层无铅焊点(最易失效)。

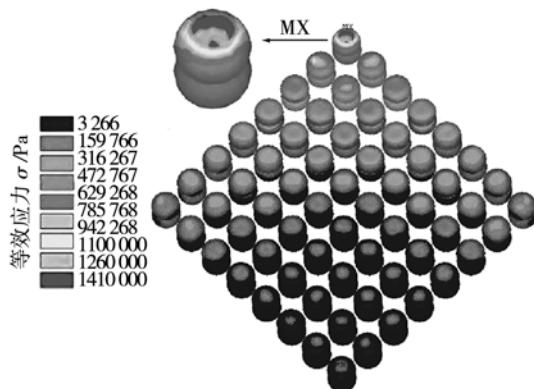


图 2 叠层焊点等效应力分布云图

Fig. 2 Equivalent stress distribution of stacked solder joints

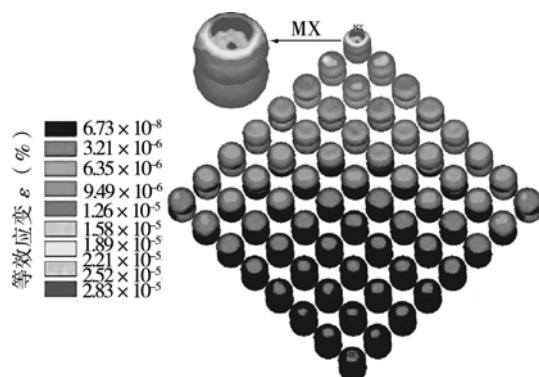


图 3 叠层焊点等效应变分布云图

Fig. 3 Equivalent strain distribution of stacked solder joints

1.3 不同结构方式焊点随机振动应力应变对比

为对比分析单层焊点和叠层焊点随机振动应力应变大小以及考察有、无底充胶对叠层焊点随机振动应力应变的影响，分别建立了单层无底充胶焊点、

叠层无底充胶焊点与叠层有底充胶焊点这三种不同结构方式的有限元模型。三种模型中焊点材料均为 95.5Sn3.8Ag0.7Cu, 模型尺寸参数均如文中 1.1 节所述, 对这三种模型均施加相同的前述随机激励, 所得单层无底充胶焊点和叠层无底充胶焊点关键焊点内最大应力结果如图 4 所示(叠层有底充胶焊点应力见图 2), 表 2 所示为三种模型关键焊点内的最大应力应变数值。

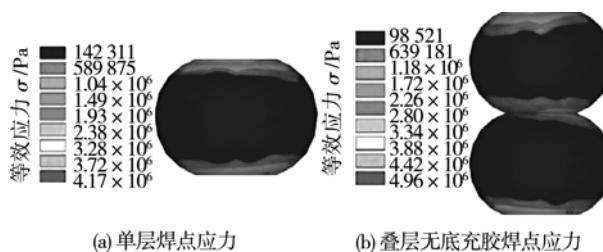


图 4 不同结构关键焊点等效应力分布云图

Fig. 4 Stress distribution within key solder joint equivalent with different assembly structures

表 2 不同结构模型的随机振动应力应变对比

Table 2 Comparison of stress and strain with different solder joint assembly structures

结构方式	最大应力 σ/MPa	最大应变 $\varepsilon/(\times 10^{-5})$
无底充胶单层焊点	4.17	8.38
无底充胶叠层焊点	4.96	9.97
底充胶叠层焊点	1.41	2.83

从图 2 和图 4 中可见, 不同结构方式的焊点在随机振动加载条件下焊点上下两个端面(芯片一侧和 PCB 一侧)均是应力集中区域。从表 2 可知, 无底充胶叠层无铅焊点内的最大应力应变分别为 4.96 MPa 和 9.97×10^{-5} , 而无底充胶单层无铅焊点内的最大应力应变分别为 4.17 MPa 和 8.38×10^{-5} , 由此可知, 在相同的随机振动加载条件下, 无底充胶叠层无铅焊点内的应力应变是大于无底充胶单层无铅焊点的, 因此, 虽然采用叠层方式可以有效的提高焊点的热疲劳寿命, 但当叠层焊点在振动环境下工作时, 其振动疲劳寿命与单层焊点相比却有所降低; 而在采用底充胶填充之后, 有底充胶叠层无铅焊点内的最大应力应变分别为 1.41 MPa 和 2.83×10^{-5} , 最大应力应变数值均小于无底充胶单层无铅焊点的。采用底充胶进行填充以后在同等随机振动加载条件下焊点内的最大应力和最大应变分别比单层焊点降低了 66.19% 和 66.23%, 由此可见, 采用底充胶对叠层焊点进行填充可以有效的降低随机振动载荷作用下焊点内的应力应变, 可以同时提高焊点的热疲劳

寿命和振动疲劳寿命。

2 焊点材料及底充胶参数对叠层焊点随机振动应力应变影响

2.1 焊点材料对叠层焊点应力应变影响

分别选取四种焊点材料为 Sn95.5Ag3.8Cu0.7, Sn96.5Ag3Cu0.5, Sn-3.5Ag 和 Sn63Pb37, 其余参数均保持不变, 建立相应的有限元分析模型, 研究不同焊料对底充胶叠层焊点随机振动应力应变影响, 所得结果如表 3 所示。从表 3 中的应力应变数据可以看出, 在四种材料中采用无铅焊料 Sn-3.5Ag 的底充胶叠层焊点内的最大应力应变最小, 采用无铅焊料 Sn96.5Ag3Cu0.5 的焊点内的最大应力应变最大。

表 3 不同焊料时叠层焊点随机振动应力应变对比

Table 3 Comparison of stress and strain with different solder joint material

焊点材料	最大应力 σ/MPa	最大应变 $\varepsilon/(\times 10^{-5})$
Sn95.5Ag3.8Cu0.7	1.41	2.83
Sn96.5Ag3Cu0.5	1.51	3.91
Sn-3.5Ag	1.15	1.72
Sn63Pb37	1.42	3.18

2.2 底充胶弹性模量对叠层焊点应力应变影响

将叠层焊点的焊点材料选取为 Sn95.5Ag3.8Cu0.7, 改变底充胶弹性模量, 其它参数保持不变, 将底充胶的弹性模量依次取为 4.9, 7.0, 8.0, 8.265 和 9.69 GPa, 分别建立相应有限元分析模型, 研究底充胶弹性模量变化对叠层焊点随机振动应力应变的影响, 对相应的模型进行有限元分析后所得结果如表 4 所示。

表 4 不同底充胶弹性模量时叠层焊点随机振动应力应变对比

Table 4 Comparison of stress and strain with different underfill elastic modulus

底充胶弹性模量 E/GPa	最大应力 σ/MPa	最大应变 $\varepsilon/(\times 10^{-5})$
4.9	1.41	2.83
7.0	1.34	2.70
8.0	1.32	2.65
8.265	1.31	2.63
9.69	1.29	2.58

从表 4 中应力应变数据可以看出, 随着底充胶弹性模量的增大, 叠层无铅内的随机振动应力应变值均减小, 由此可见, 在相同条件下, 弹性模量大的

底充胶有利于减小焊点内的随机振动应力应变,因此,当叠层焊点需要在振动环境下工作时,为进一步提高焊点的振动疲劳寿命,应当选择弹性模量较大的底充胶对叠层焊点进行底部填充。

2.3 底充胶密度对底充胶叠层 PBGA 无铅焊点应力应变影响

将叠层焊点的焊点材料选取为 Sn95.5Ag3.8Cu0.7, 改变底充胶密度^[8], 其它参数保持不变, 将底充胶的密度依次取为 1.21, 1.43, 1.65, 1.75 和 1.79 kg/m³, 分别建立相应的有限元分析模型, 研究底充胶密度的变化对叠层焊点随机振动应力应变的影响, 对相应的模型进行有限元分析后所得结果如表 5 所示。

表 5 不同底充胶密度时叠层焊点随机振动应力应变对比
Table 5 Comparison of stress and strain with different underfill density

底充胶密度 ρ /(kg·m ⁻³)	最大应力 σ /MPa	最大应变 ε /($\times 10^{-5}$)
1.21	1.37	2.75
1.43	1.39	2.78
1.65	1.40	2.82
1.75	1.41	2.83
1.79	1.41	2.84

从表 5 中应力应变数据可以看出, 随着底充胶密度的增大, 叠层无铅内的随机振动应力应变值均相应增大, 由此可见, 在相同条件下, 密度大的底充胶不利于减小焊点内的随机振动应力应变, 因此, 当叠层焊点需要在振动环境下工作时, 为进一步提高焊点的振动疲劳寿命, 应当选择密度较小的底充胶对叠层焊点进行底部填充。

3 结 论

(1) 与无底充胶单层无铅焊点和无底充胶叠层无铅焊点相比, 采用底充胶对叠层焊点进行填充可以有效的降低随机振动载荷作用下焊点内的应力应变, 可以提高焊点的振动疲劳寿命。

(2) 对于 Sn95.5Ag3.8Cu0.7, Sn96.5Ag3Cu0.5, Sn-3.5Ag 和 Sn63Pb37 这四种焊料, 在其它条件相同下, 采用无铅焊料 Sn-3.5Ag 的底充胶叠层焊点内的最大应力应变最小, 采用无铅焊料 Sn 96.5 Ag3Cu0.5 的焊点内的最大应力应变最大。

(3) 在其它参数不变的情况下, 仅改变底充胶弹性模量, 随着底充胶弹性模量的增大, 叠层无铅内的随机振动应力应变值均相应减小, 弹性模量大的底充胶有利于减小焊点内的随机振动应力应变, 在

振动环境下应选择弹性模量较大的底充胶对叠层焊点进行底部填充, 以提高叠层焊点的振动疲劳寿命。

(4) 在其它参数不变的情况下, 随着底充胶密度的增大, 叠层无铅内的随机振动应力应变值均相应增大, 在相同条件下, 密度大的底充胶不利于减小焊点内的随机振动应力应变。

参考文献:

- [1] 叶焕, 薛松柏, 张亮, 等. CSP 器件无铅焊点可靠性的有限元分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 93–96.
Ye Huan, Xue Songbai, Zhang Liang, et al. Finite element analysis on reliability of lead-free soldered joints for CSP device [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 93–96.
- [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. Fatigue life prediction of SnAgCu soldered joints of FCBGA device [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 85–88.
- [3] Kathy Wei Yan, R Wayne Johnson. Double bump flip-chip assembly[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2006, 29(2): 119–133.
- [4] 韦何耕, 黄春跃, 梁颖, 等. 热循环加载条件下 PBGA 叠层无铅焊点可靠性分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 91–94.
Wei Hegeng, Huang Chunyue, Liang Ying, et al. Reliability analysis of plastic ball grid array double-bump lead-free solder joint under thermal cycle [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 91–94.
- [5] Ong J M G, Tay A A O, Zhang X, et al. Optimization of the thermomechanical reliability of a 65 nm Cu/low-k large-die flip chip package [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2009, 32(4): 838–848.
- [6] 郭强, 赵玫, 孟光. 随机振动条件下 SMT 焊点半经验疲劳寿命累积模型[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 24–26.
Guo Qiang, Zhao Mei, Meng Guang. Random fatigue semi-empirical model of SMT solder joint [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 24–26.
- [7] Edward S Ibea, Karl I Loha, Jing-en Luan, et al. Effect of unfilled underfills on drop impact reliability performance of area array packages[A]. Proceedings of IEEE 56th Electronic Components and Technology Conference[C]// Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2006. 462–466.
- [8] Alfredo Genovese, Fulvio Fontana, Mario Cesana, et al. Solder extrusions and underfill delaminations: a remarkable flip chip qualification experience[J]. The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 2001, 24(1): 53–60.

作者简介: 黄春跃,男,1971年出生,博士,教授。主要从事微电子封装与组装可靠性技术方面的研究工作。发表论文40余篇。Email: hcymail@163.com