

PCB 焊点热循环失效分析和改进设计*

苏佩琳, 李 涛, 彭雄奇

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

(本刊编委彭雄奇来稿)

摘要: 针对 PCB(印制电路板)焊点在高温低温热循环下的失效,建立了传统结构的三维模型和在芯片边角下加锡块的改进设计模型,通过实验测得 FR-4 的弹性模量和热膨胀系数,用 ANSYS 计算了 PCB 在高温低温循环下的应力应变,并用修正的 Coffin-Manson 经验方程计算了焊点的热循环寿命.结果表明,通过在芯片边角下加锡块,PCB 焊点的最大等效塑性应变显著降低,其热疲劳寿命得到明显提高.

关键词: PCB; 热循环; 有限元模拟; 疲劳寿命

中图分类号: TG404; TG405 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.04.009

引 言

印制电路板(printed circuit board, PCB)是重要的电子部件,在整机产品的运行中起到至关重要的作用.为确保 PCB 长期在各种环境下能稳定可靠工作,需对 PCB 进行高温低温循环冲击试验,循环寿命达到标准才可投入生产.在高温低温循环时,PCB 交替膨胀和收缩.由于芯片、焊点以及基板材料的热膨胀系数不匹配,在焊点内部必然会产生热应力和应变,应力应变的大小和方向会随着温度的变化而变化^[1].在长期交变的热应力作用下,焊点因疲劳导致裂纹的产生和扩展进而断裂^[2],从而使电子产品失效.因此,焊点可靠性已成为电子组装及封装领域中关键问题之一^[3].

传统结构的 PCB 热循环寿命达不到要求,即循环不到 500 次就失效.本文提出一种 PCB 结构的改进设计方案,在芯片边角下加锡块,机械地限制了焊锡与上下板之间的变形不协调,以期提高焊点的热疲劳寿命.用有限元方法模拟 PCB 在高温低温循环下的应力应变,并用修正的 Coffin-Manson 经验方程计算焊点的热循环寿命^[4],比较改进设计前后 PCB 的性能.

1 热循环冲击试验

PCB 高温低温循环热冲击试验^[5]采用的加载曲线如图 1 所示.温度的变化范围为 $-40 \sim 125$

* 收稿日期: 2014-10-21; 修订日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(11172171)

作者简介: 苏佩琳(1991—),女,湖北荆门人,硕士生(E-mail: su7259@163.com);

彭雄奇(1970—),男,湖南娄底人,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: xqpeng@sjtu.edu.cn).

℃,升、降温速率为 20 ℃/min,保温时间为 30 min.在高低温度循环下,PCB 交替膨胀和收缩,产生热应力和应变,焊层界面也在交变的热应力循环下产生疲劳破坏.常见的焊点破坏包括焊缝断裂和焊缝脱裂,如图 2 所示.

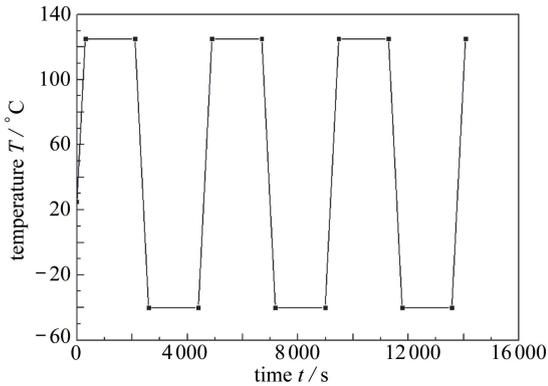


图 1 热循环加载曲线

Fig. 1 The thermal impact cycle curve

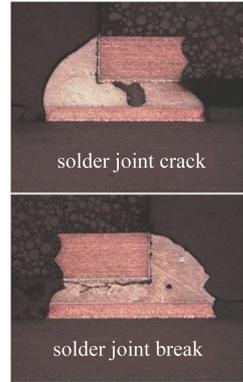


图 2 PCB 焊点破坏

Fig. 2 The PCB solder damage forms

2 材料参数测定

PCB 的热应力仿真涉及到热-力耦合,需确定各种材料的热力学参数,包括:密度、比热比、弹性模量、Poisson(泊松)比、热膨胀系数、导热系数等.其中,铜、焊锡、芯片材料的参数和 FR-4 的部分参数,由厂商提供或通过查阅资料文献获取.而 FR-4 在不同温度下的弹性模量和热膨胀系数则通过实验测得.

2.1 弹性模量测定

通过拉伸实验,测定 FR-4 在不同温度(-40 ℃,0 ℃,25 ℃,60 ℃,125 ℃)下的弹性模量.参照 GB/T 1040.2-2006/ISO 527-2:1993 选用试样,实验仪器选用带保温箱的 SANS CMT5105 微机控制电子万能试验机,实验试样及仪器如图 3 所示.



图 3 拉伸实验试样及仪器

Fig. 3 The tensile test specimens and the instrument

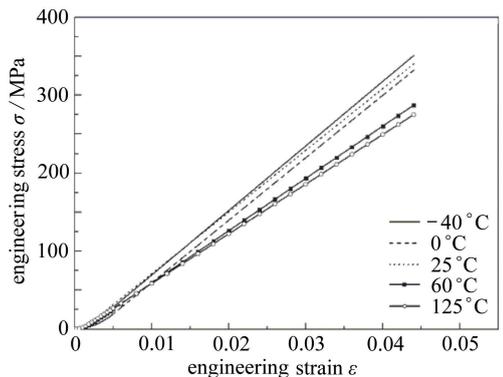


图 4 应力-应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curve

实验过程如下:1) 将恒温箱的温度分别控制在-40 ℃,0 ℃,25 ℃,60 ℃和 125 ℃,每组 5 个试样,进行拉伸试验;2) 试样拉伸速度控制为 2 mm/min,同时输出应力-应变曲线,直至应力-应变线性关系不明显,停止拉伸;3) 从计算机中读出试样在该温度下的弹性模量,记录数据;4) 根据实验测出的数据,综合分析得出 FR-4 在各温度下的弹性模量.试样在不同温度下

的拉伸应力-应变曲线(平均值)如图 4 所示.由上述拉伸实验应力-应变曲线得到,FR-4 在不同温度的弹性模量见表 1.

表 1 FR-4 在不同温度下的弹性模量

Table 1 Young's moduli of FR-4 at different temperatures

temperature $T/^\circ\text{C}$	-40	0	25	60	125
Young's modulus E/GPa	8.28	8.01	7.92	6.71	6.37

2.2 热膨胀系数的测定

用热膨胀仪测定 FR-4 在不同温度(25~125 $^\circ\text{C}$)下的热膨胀系数.由于 FR-4 的各向异性,其平面方向和厚度方向的热膨胀系数不同,需分别测量.选用德国 NETZSCH 公司的热膨胀仪 DIL402C,如图 5 所示.根据热膨胀仪的标准试样尺寸要求,选用直径 5 mm,高度 25 mm 的圆柱试样.

实验过程如下: 1) 平面方向和厚度方向各取 2 个试样进行实验; 2) 控制仪器炉体的温度,从 25 $^\circ\text{C}$ 升高到 125 $^\circ\text{C}$,升温速度控制在 1 $^\circ\text{C}/\text{min}$; 3) 根据实验数据,计算出 FR-4 在各温度下的热膨胀系数如图 6 所示, x/y 和 z 分别为平面方向和厚度方向热膨胀系数.

由上述曲线的局部线性,取 3 个温度点的热膨胀系数作为 FR-4 的该项参数.由于 FR-4 的热膨胀系数变化范围不大,对于-40~25 $^\circ\text{C}$ 时的参数,仍取 25 $^\circ\text{C}$ 时的数值.FR-4 在不同温度下的热膨胀系数如表 2 所示.

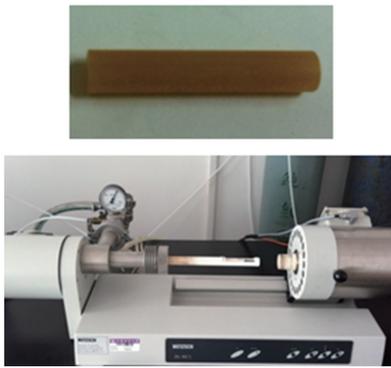


图 5 热膨胀实验试样及仪器

Fig. 5 The thermal expansion test specimen and the instrument

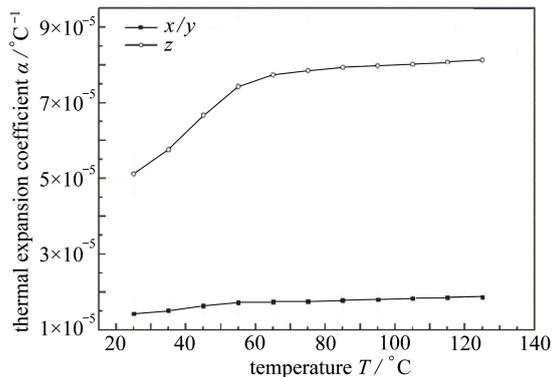


图 6 热膨胀系数变化曲线

Fig. 6 The curve of the thermal expansion coefficient

表 2 FR-4 的热膨胀系数

Table 2 The thermal expansion coefficients of FR-4

temperature $T/^\circ\text{C}$	thermal expansion coefficient $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	
	x/y	z
-40	1.43E-05	5.12E-05
25	1.43E-05	5.12E-05
55	1.72E-05	7.43E-05
125	1.87E-05	8.13E-05

3 有限元模型建立

3.1 三维模型

根据 PCB 实际结构建立其三维模型,包括传统结构模型(model 1)和边角加锡块(corner

pad)的改进模型(model 2),corner pad不起电气连接作用,两模型均由4部分组成:芯片、焊锡(SAC305)、铜层(copper)和FR-4层,其中芯片包含molding, die, die attach, lead frame 4个部件.根据施加载荷和几何形状的对称性,建立了1/4的有限元模型^[6],如图7所示.

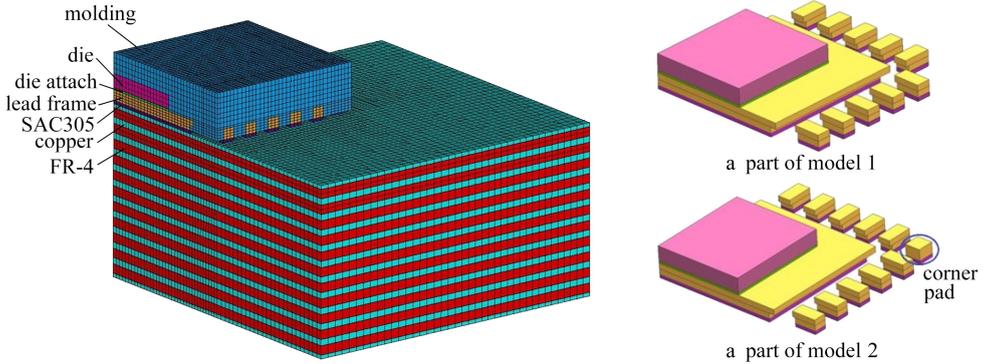


图7 三维模型

Fig. 7 The 3D model of PCB

选择20节点的solid226耦合单元,划分六面体网格.为增加计算结果的精确性,对焊点处的网格细密划分,其它部分适当稀疏划分.模型网格如图7所示,其中model 1有111 103个单元和118 842个节点,model 2有989 48个单元和105 720个节点.

3.2 材料模型

考虑7种材料,分别是4种芯片材料、焊锡、铜以及FR-4.其中,芯片材料、铜和FR-4均采用线弹性材料模型,材料参数^[7-9]见表3.

表3 线弹性材料参数

Table 3 Elastic parameters of the PCB materials

material	copper	SAC305	FR-4	molding	die	die attach	lead frame		
density $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	8.9	7.39	3	2.04	2.33	3.6	8.8		
Young's modulus E / GPa	123	54.9	-40 °C	8.28	-70 °C	26.7			
			0 °C	8.01	0 °C	24.2			
			25 °C	7.92	50 °C	23.6	-65 °C	14.5	
			60 °C	6.71	96 °C	22.2	25 °C	11.8	
			125 °C	6.37	111 °C	17.9	150 °C	8.58	
					126 °C	7.95			
Poisson's ratio ν	0.35	0.31	0.28	0.3	0.278	0.33	0.34		
specific heat $c / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{°C}))$	390	230	1 130	2 030	710	500	380		
thermal expansion coefficient $10^6 \alpha / \text{°C}^{-1}$	17.5	21.9	$x/y \quad z$		7	2.61	64	17	
			-40 °C	14.3					51.2
			25 °C	14.3					51.2
			55 °C	17.2					74.3
			125 °C	18.7	81.3				
thermal conductivity $\lambda / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C}))$	390	64	0.35	0.7	148	2.5	230		

焊锡材料为 SAC305 (Sn96.5% \ Ag3.0% \ Cu0.5%), 其力学行为表现为粘塑性. Anand 本构

模型可以反映粘塑性材料与应变速率、温度相关的变形行为,以及应变速率历史效应、应变硬化和动态回复等特征。Anand 本构模型的应力方程^[10-11]可描述为

$$\sigma = cs^* - [(cs^* - cs_0)^{(1-a)} + (a-1)\{(ch_0)(cs^*)^{-a}\}\varepsilon_p]^{1/(1-a)}, \quad (1)$$

其中, c 为与温度和应变速率相关的函数, s_0 为变形抗阻 s 的初始值, s^* 为给定温度和应变速率下 s 的饱和值; a 为硬化/软化的应变速率敏感指数, h_0 为硬化/软化常数, ε_p 为非弹性应变。

c 是温度和应变速率的函数, 表达式为

$$c = \frac{1}{\xi} \operatorname{arsinh} \left\{ \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^m \right\}, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m}, \quad (3)$$

其中, ξ 为应力乘子, $\dot{\varepsilon}_p$ 为非弹性应变速率, A 为指数因数, Q 为激活能, R 为普适气体常数, T 为绝对温度, m 为应变速率敏感指数。

变形抗阻 s 的演化方程表示为

$$\dot{s} = \left[h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^a \operatorname{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right] \dot{\varepsilon}_p, \quad a > 1, \quad (4)$$

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n, \quad (5)$$

其中, \hat{s} 为系数, n 为变形阻抗饱和值的应变速率敏感指数。

根据上述 Anand 本构方程知, 一共有 9 个参数: $s_0, Q, A, \xi, m, h_0, \hat{s}, n$ 以及 a , 各项数值^[12]见表 4。

表 4 焊锡 SAC305 粘塑性 Anand 参数

Table 4 Anand parameters of solder SAC305

Anand parameter	s_0/MPa	$(Q/R)/\text{K}^{-1}$	A/s^{-1}	ξ	m	h_0/MPa	\hat{s}/MPa	n	a
value	21.00	9 320	3 501	4.0	0.25	1.8E5	30.2	0.01	1.78

3.3 载荷与边界条件

模拟热循环冲击试验, 温度循环加载在外部节点上。由于焊点的应力应变在热循环过程中呈周期性变化, 而且一般在第 3 周期时趋于稳定, 因此在有限元分析时采用 3 个热循环周期进行计算^[13], 即模拟图 1 中的 3 个循环。零应力应变状态时的参考温度设为 25 °C^[14]。约束底边垂直方向位移, 并对对称面施加对称边界条件。在进行求解时, 采用瞬态非线性分析。

4 计算结果与比较

4.1 温度场

图 8 为 PCB 温度分布图。可以看出 PCB 表面与内部具有一定的温差, 最大温差可达 6~8 °C (图中温度单位为 K), PCB 各部分温度不一致对加剧变形不协调有一定的影响。

4.2 应力应变

焊点在环境温度循环条件下的失效是试验中 PCB 失效的主要原因, 因此将焊点作为主要研究对象。图 9 分别为两模型整体应力最大时刻 (2 640 s) 的焊点 von Mises 应力云图, 边角焊点的根部 (MX 处) 为应力集中处。对比两图可知, 两模型的最大等效应力值相差不大, 不同的是, 模型 2 是由非功能性的 corner pad 承担了最大应力。

分别选取两模型中焊点 (不含 corner pad) 等效应力最大的部位 A, 考察该处等效应力随

时间变化的曲线,如图 10 所示.可以看出,模型 1 和模型 2 所选部位的等效应力随时间的变化趋势相同,前者等效应力值比后者稍大.

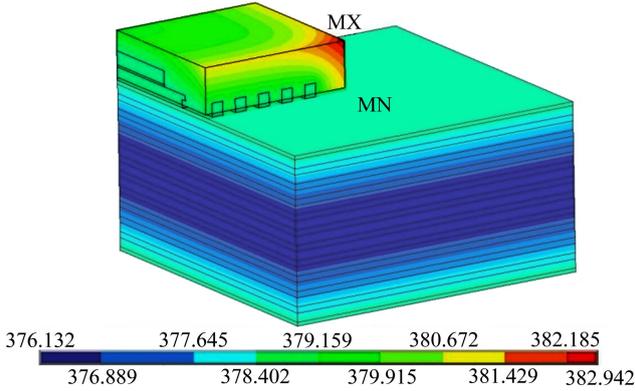
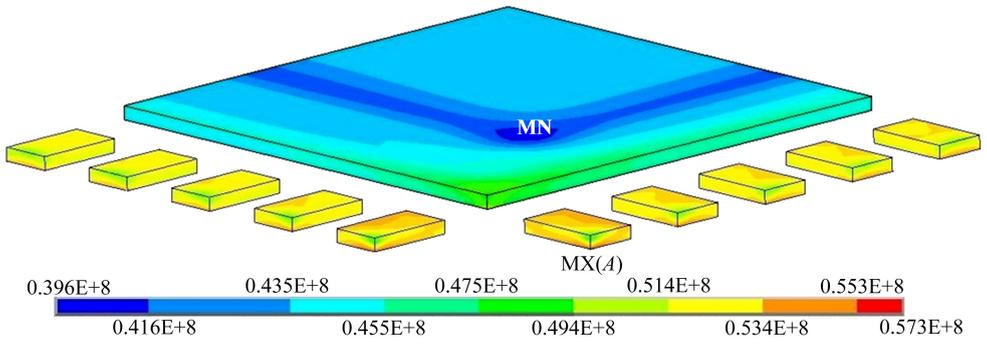


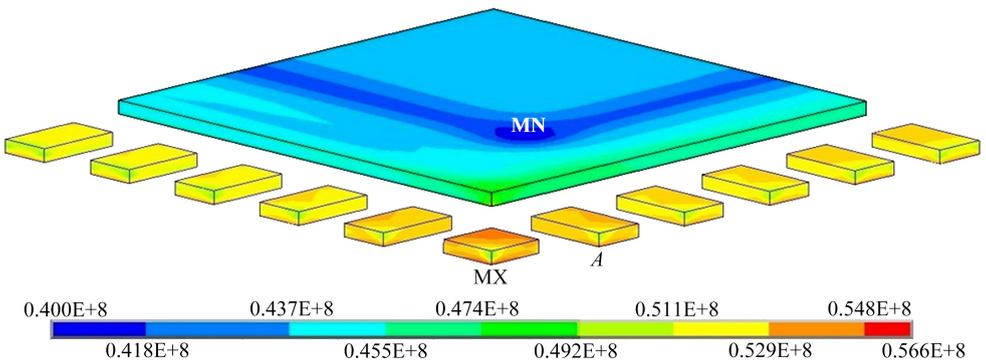
图 8 PCB 温度分布

Fig. 8 The temperature contour of PCB



(a) 模型 1(单位: Pa)

(a) Model 1(unit: Pa)



(b) 模型 2(单位: Pa)

(b) Model 2(unit: Pa)

图 9 von Mises 应力云图

Fig. 9 The von Mises stress contours of the solder pads

焊点疲劳破坏是塑性应变导致,由于 Coffin-Manson 方程是根据塑性剪切应变范围计算疲劳寿命,故分别选取两模型焊点(不含 corner pad)塑性应变最大的部位 A,考察该处剪切塑性应变随时间变化的曲线,如图 11 所示.可以看出,模型 1 的塑性剪切应变范围大于模型 2.

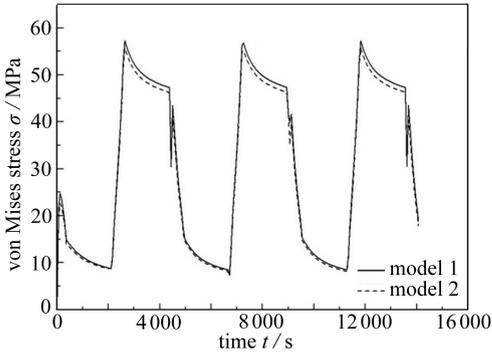


图 10 等效应力变化曲线

Fig. 10 The curves of von Mises stresses

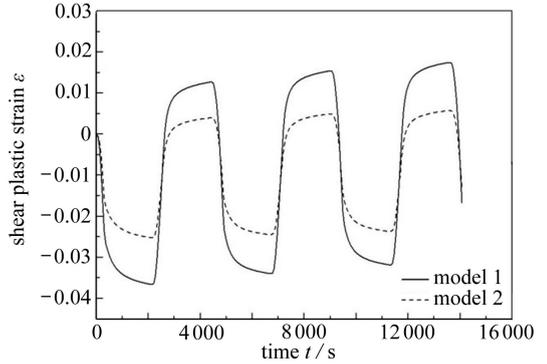


图 11 塑性剪切应变变化曲线

Fig. 11 The curves of shear plastic strains

4.3 疲劳寿命预测

根据修正的 Coffin-Manson 方程^[15],可评估焊点的热疲劳寿命.其表达式为

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma_p}{2\varepsilon_f} \right)^{1/c}, \quad (6)$$

式中, N_f 为焊点的热疲劳寿命, $\Delta\gamma_p$ 为每个热疲劳周期中焊点内累积的最大塑性剪切应变范围, ε_f 为疲劳韧性系数, 这里取 0.325; c 为疲劳韧性指数, 与热循环的温度和频率有关, 如式 (2) 所示:

$$c = -0.442 - 6 \times 10^{-4} \cdot t_m + 1.74 \times 10^{-2} \cdot \ln(1 + f), \quad (7)$$

式中, t_m 为热循环平均温度($^{\circ}\text{C}$), f 为热循环频率(T/d).根据图 1 中的热循环曲线, 计算得 $c = -0.414$.

根据图 11 中的塑性剪切应变曲线, 两模型疲劳寿命预测情况见表 5.

表 5 两模型疲劳寿命预测情况

Table 5 The fatigue life prediction for the 2 models

model	strain range $\Delta\gamma_p$	life prediction N_f	qualification
model 1	0.049 1	256 (<500)	unqualified
model 2	0.029 3	892 (>500)	qualified

由表 5 可知, 改进设计模型的疲劳寿命较传统模型有很大提高, 并且超过 500 次, 达到质量标准.

5 结 论

1) PCB 表面与内部最大温差可达 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$, 各部分温度不一致对加剧变形不协调有一定的影响.

2) 边角焊点的根部为应力集中的部位, 同时也是变形集中的部位, 传统模型的应力、应变均大于改进模型.

3) 在改进模型中, corner pad 承担了最大应力、应变, 对于减小焊点处的应力、应变, 延长焊点疲劳寿命起关键作用.

4) 通过剪切塑性应变范围计算焊点的疲劳寿命, 改进模型的疲劳寿命较传统模型有很大提高, 达到质量标准.

参考文献(References):

- [1] Tohmyoh H, Ishikawa S, Watanabe S, Kuroha M, Nakano Y. Estimation and visualization of the fatigue life of Pb-free SAC solder bump joints under thermal cycling[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, **53**(2): 314-320.
- [2] 刘建涛, 杜平安, 黄明镜, 周晴. 结构疲劳长裂纹扩展速率新模型研究[J]. 应用数学和力学, 2009, **30**(5): 538-546.(LIU Jian-tao, DU Ping-an, HUANG Ming-jing, ZHOU Qing. Research on new model of long fatigue crack propagation rates for structures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, **30**(5): 538-546.(in Chinese))
- [3] Sidhu R S, Chawla N. Thermal fatigue behavior of Sn-rich (Pb-free) solders[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, **39**(4): 799-810.
- [4] 吴玉秀, 薛松柏, 张玲, 黄翔. QFP 组件的优化模拟及焊点热疲劳寿命的预测[J]. 焊接学报, 2006, **27**(8): 99-102.(WU Yu-xiu, XUE Song-bai, ZHANG Ling, HUANG Xiang. Optimum simulation and prediction on thermal fatigue life of soldered joints of QFP devices[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(8): 99-102.(in Chinese))
- [5] Xiao H, Li X, Yan Y, Liu N, Shi Y. Damage behavior of SnAgCu solder under thermal cycling [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, **42**(2): 221-226.
- [6] Zulkifli M N, Jamal Z A Z, Quadir G A. Temperature cycling analysis for ball grid array package using finite element analysis[J]. *Microelectronics International*, 2011, **28**(1): 17-28.
- [7] 陈柳, 张群, 王国忠, 谢晓明, 程兆年. 倒装焊 SnPb 焊点热循环失效和底充胶的影响[J]. 半导体学报, 2001, **22**(1): 107-112.(CHEN Liu, ZHANG Qun, WANG Guo-zhong, XIE Xiao-ming, CHENG Zhao-nian. Thermal cycle failure of SnPb solder joint for flip chip package and effects of underfill material[J]. *Journal of Semiconductors*, 2001, **22**(1): 107-112.(in Chinese))
- [8] 秦飞, 安彤. 焊锡材料的应变率效应及其材料模型[J]. 力学学报, 2010, **42**(3): 439-447.(QIN Fei, AN Tong. Strain rate effects and material models of solders[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, **42**(3): 439-447.(in Chinese))
- [9] 王兴久, 沈煜年. 多芯片双面 PCB 的热应力分析[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2010, **34**(2): 170-175.(WANG Xing-jiu, SHEN Yu-nian. Thermal stress analysis of double-sided PCB with multiple chips[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Nature Science)*, 2010, **34**(2): 170-175.(in Chinese))
- [10] Brown S B, Kim K H, Anand L. An internal variable constitutive model for hot working of metals[J]. *International Journal of Plasticity*, 1989, **5**(2): 95-130.
- [11] Anand L. Constitutive equations for the rate-dependent deformation of metals at elevated temperatures[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1982, **104**(1): 12-17.
- [12] Motalab M, Cai Z, Suhling J C, Lall P. Determination of Anand constants for SAC solders using stress-strain or creep data [C]//13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (I Therm), IEEE, 2012: 910-922.
- [13] Che F X, Pang J H L. Characterization of IMC layer and its effect on thermomechanical fatigue life of Sn-3.8Ag-0.7Cu solder joints[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, **541**: 6-13.
- [14] 盛重, 薛松柏, 张亮, 皋利利. 基于蠕变模型倒装芯片焊点疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2008, **29**(10): 53-56.(SHENG Zhong, XUE Song-bai, ZHANG Liang, GAO Li-li. Fatigue life prediction for flip chip soldered joints based on creep stain model[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(10): 53-56.(in Chinese))
- [15] Engelmaier W. Fatigue life of leadless chip carrier solder joints during power cycling[J].

IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1983, 6(3): 232-237.

Fatigue Failure Analysis and Structural Improvement of PCB Solder Joints Under Thermal Cycles

SU Pei-lin, LI Tao, PENG Xiong-qi

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, P.R.China)

(Contributed by PENG Xiong-qi, M. AMM Editorial Board)

Abstract: To investigate the fatigue failure of PCB solder joints under thermal impact cycles, a 3D finite element model of PCB with the traditional structure was built. For comparison, an improved structural model with solder pads added at the QFN corners was also built. Based on the measurement of Young's moduli and thermal expansion coefficients of FR-4 by experiment, the thermo-mechanical FE analysis was conducted on the 2 models in ANSYS. The thermal fatigue life of the PCB solder joints was evaluated by means of the modified Coffin-Manson equation according to the FEA results. It is found that the peak equivalent plastic strain at the PCB solder joints is significantly reduced after addition of the solder pads at the QFN corners, and the thermal fatigue life of the PCB solder joints was thus greatly improved.

Key words: PCB; thermal cycle; finite element analysis; fatigue life

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(11172171)