

QFP 结构在温度循环下的有限元分析

洪家娣¹, 张元才²

(华东交通大学 1. 机电工程学院; 2. 职业技术学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 如果 QFP 电子封装器件发生较大塑性变形, 将影响其正常使用. 利用有限元分析技术来讨论温度循环载荷作用下影响 QFP 焊点塑性变形的因素, 为控制其变形幅度提供依据.

关键词: 方形扁平封装器件; 电子封装; 有限元法; 温度循环; 塑性应变

中图分类号: TB125

文献标识码: A

芯片的封装技术已经历好几代的变迁, 技术指标一代比一代先进, 要求芯片面积与封装面积之比越来越接近, 适用频率越来越高, 耐温性能越来越好, 引脚数增多, 引脚间距减小, 重量减小, 可靠性提高, 使用更加方便等等. 塑封 QFP (Quad Flat Package) (见图 1) 是目前表面贴装型多端子 LSI 封装的主要形式, 以其低封装价格为特征, 在 Motorola 和 Inter 等诸多大公司中得到广泛运用^[1, 2]. 使用 QFP 的最大问题是引脚端子的变形, 用 QFP 封装的大量的 LSI 往往因此而失效. QFP 的引脚端子越细, 越容易变形. 一旦变形, 就难保证与电路板的正常焊接. 因此, 对于 QFP 结构的塑性变形分析显得尤为重要. 故本文将阐述温度循环下 QFP 引脚端子变形的有限元分析方法, 并重点分析 QFP 结构的塑性变形的影响因素.

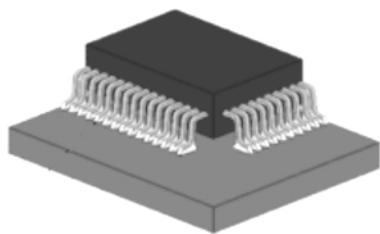


图 1 取 1/4 的塑封 QFP 器件

1 组装在印制电路板上的 QFP 有限元模型

的建立

1.1 Anand 黏塑性本构模型

由于钎焊材料的熔点较低, 如 60Sn40Pb (质量分数) 钎料的熔点约为 183℃, 电子封装及组件的工作环境温度往往可达焊点熔点的 0.48~0.87 倍, 在这种工作环境下, 焊点中不但产生弹性变形和塑性变形, 且还会产生明显的蠕变变形. 对焊点有限元分析中常采用统一型 Anand 黏塑性本构模型来描述焊料的变形行为, Anand 本构模型可以反映黏塑性材料与应变速率、温度相关的变形行为, 以及应变速率的历史效应、应变硬化和动态回复等特征^[3], 即

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = A \left(m \sqrt{\sinh(\zeta \sigma / s)} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \right) \quad (1)$$

式中, 内变量的演化方程为

$$\frac{ds}{dt} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \quad (2)$$

$$B = 1 - \frac{S}{S^*} \quad (3)$$

$$S^* = \hat{S} \left[\frac{d\epsilon_p/dt}{A} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \right]^n \quad (4)$$

式中 $d\epsilon_p/dt$ 为等效塑性应变速率; Q/k 为 Boltzmann 激活能常数; A 为常数; ζ 为应力乘子; σ 为等效应力; h_0 为硬化常数; S^* 为 S 的饱和值; $\hat{S}$ 为系数; T 为绝对温度; m 为应变速率敏感指数; a 为应变

收稿日期: 2007-10-23

作者简介: 洪家娣 (1949-) 女, 上海人, 华东交通大学教授.

率硬化敏感指数; n 为饱和值应变率敏感指数.

1.2 有限元模型的建立

图1为三维结构,但为了处理问题的方便,这里采用文[1]的做法,只考虑一个引脚,并简化为平面应变问题. QFP 结构经过简化后共包括4个部分:硅片、引线(铜)、焊点和印制电路板(FR-4板).蠕变最小位能原理的泛函可表示为^[4]

$$\Pi_c(U) = \int_V \frac{1}{2} (\varepsilon_p)^T D_c \varepsilon_p dV - \int_V \bar{\delta} u f dV - \int_{S_\sigma} \bar{\delta} u T dS \quad (5)$$

式中 V 为全域面积; S_σ 为域边界; D_c 为蠕变本构矩阵; $\varepsilon_p = d\varepsilon_p/dt$; u 为速度; $\bar{f}$ 为广义面力; $\bar{T}$ 为广义边界力. 考虑到 u 的不可压缩条件,采用罚函数方法将泛函(5)式改写为

$$\Pi_c^*(U) = \Pi_c(U) + \int_V \frac{1}{2} \lambda (u_{l,i})^2 dV \quad (6)$$

式中 $u_{l,i} = u_{1,i} + u_{2,i} + u_{3,i} = 0$; λ 是罚数.

对求解域进行有限元离散,并将单元内的速度 u 表示成单元结点速度的插值形式 $u = Nu$. 这样,从(6)式就可以得到稳态蠕变分析的有限元求解方程

$$K(\varepsilon_c) u = Q \quad (7)$$

其中 $K(\varepsilon_c)$ 为刚度矩阵; Q 为载荷矢量. 这里

采用 ANSYS 软件进行求解,整个模型采用四边形单元,其中焊点采用黏塑性单元 VISCO108,其余部分采用 PLANE82 单元,有限元网格划分如图2所示.

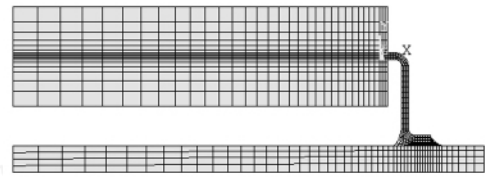


图2 有限元模型

2 QFP 变形影响因素分析与讨论

2.1 材料参数

铜线引脚、印制电路板、硅片和焊料都假定为各同性材料,引线、印制电路板和硅片只考虑它们的弹性变形,焊料考虑它的黏塑性行为. 计算中用到的 QFP 结构各组件的材料特性如表1~表3所示.

表1 QFP 组件材料参数

材料名称	弹性模量 (GPa)	线膨胀系数 (1/K)	泊松比
铜	120.658	17e6	0.345
硅片	131	2.8e-6	0.3
FR4	22	18e-6	0.28

表2 60Sn40Pb 焊料 Anand 黏塑性模型的材料参数

参数名	S_0 (MP)	Q/R (1/K)	A (1/s)	ζ	h_0 (MP)	m	$\hat{S}$ (MP)	n	a
参数值	56.33	10 830	1.49e711	11	2 640.75	0.303	80.415	0.023 1	1.34
温度(°C)	-55	-35	-15	5	20	50	75	100	125
弹性模量(GPa)	47.97	46.89	45.79	44.38	43.25	41.33	39.45	36.85	34.59
泊松比	0.352	0.354	0.357	0.36	0.363	0.365	0.37	0.377	0.38

表3 10Sn90Pb 焊料 Anand 黏塑性模型的材料参数

参数名	S_0 (MP)	Q/R (1/K)	A (1/s)	ζ	h_0 (MP)	m	$\hat{S}$ (MP)	n	a
参数值	15.09	15 583	3.25e12	7	1 787	0.143	72.73	0.004 38	3.73
温度(°C)	-55	-35	-15	5	20	50	75	100	125
弹性模量(GPa)	25.5	24.9	24.4	23.9	23.7	22.7	22.0	21.3	20.7
泊松比	0.392	0.394	0.397	0.400	0.405	0.415	0.420	0.427	0.431

2.2 载荷及边界条件

在硅片左边的边界上施加对称约束,在印制电路板底边的边界上施加全约束. QFP 器件在实际工作中,通常是在交变温度载荷下进行工作的,而热循环载荷就是典型的交变温度载荷. 温度循环加载在全部节点上. 这里将考察两种温度循环载荷: (1) -55 °C ~ 125 °C,升、降温速率为 20 °C/min,高、低温保温时间为 25 min,热循环周期为 68 min/cycle,共进行 5 个温度循环. 并且假设模型在 25 °C 时,模型内部处于零应力状态. (2) -15 °C ~ 75 °C,其余与

(1) 相同. 温度循环加载曲线(1)和(2)如图3所示.

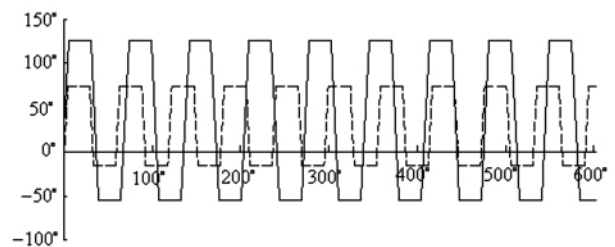


图3 温度加载曲线

2.3 影响因素讨论结果

假设采用 60Sn40Pb 焊料, 令 FR-4 板厚度为 1 cm, 受到温度加载条件(1)的作用. Von Mises 塑性应变分析结果如图 4 所示, 可见最大变形发生于焊脚左侧跟部. 此处容易成为起裂点. 塑性应变(危险点, 下同)随时间的变化规律如图 5 所示, x 向和 y 向塑性应变的平均值随时间的延长分别增大和减小. 这是发生了蠕变的结果.

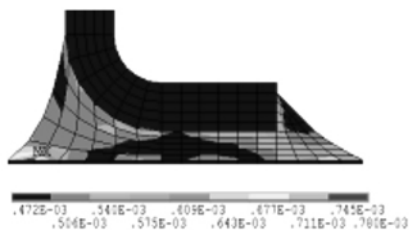


图 4 Von Mises 塑性应变云图

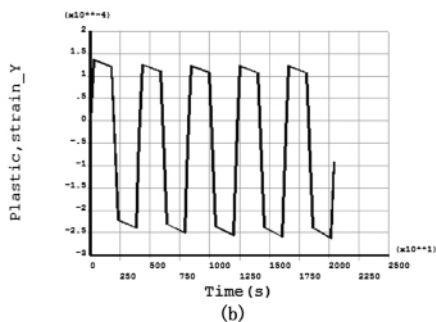
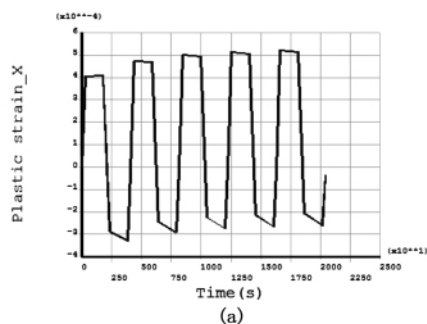


图 5 塑性应变随时间变化曲线

(a) x 向; (b) y 向

(1) FR-4 厚度的影响

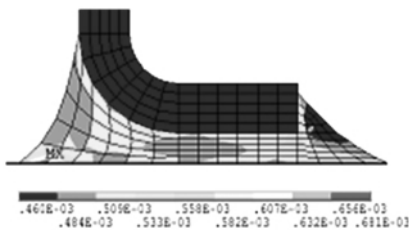


图 6 FR-4 板厚度 2.7 cm 时的

Von Mises 塑性应变云图

将 FR-4 板厚度增大为 2.7 cm. Von Mises 塑性应变分析结果如图 6 所示. 可以看到, FR-4 板的

厚度较大时, 在靠近 PCB 板的焊接区域其变形量变小了. 说明较厚的 FR-4 对焊点处应变约束力更强.

(2) 焊料对变形的影响

将焊料改为 10Sn90Pb, Von Mises 塑性应变云图如图 7 所示. 可以看出, 采用 10Sn90Pb 焊料时的塑性应变较小. 所以, 焊料材料中 Pb 与 Sn 的比例对 QFP 封装的抗热循环很有影响, 要想增强 QFP 封装的抗热循环性能, 控制好焊料中 Pb 与 Sn 成分的比例也是一个很好的方法.

x 向和 y 向塑性应变随时间变化曲线分别见图 8 和图 9. 可以发现, 采用 10Sn90Pb 焊料时, 塑性应变的幅值要偏小些; 采用 60Sn40Pb 焊料时, 塑性应变近似在 0 两侧对称波动, 而采用 10Sn90Pb 焊料时的塑性应变则偏向 0 的一侧.

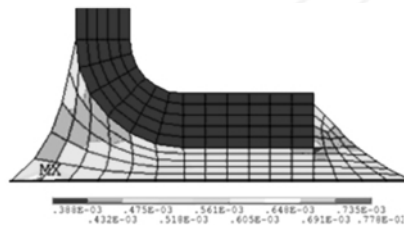


图 7 采用 10Sn90Pb 焊料时的
Von Mises 塑性应变云图

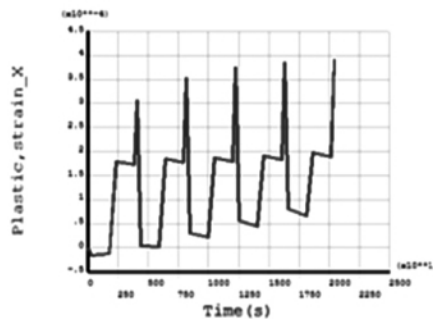


图 8 采用 10Sn90Pb 焊料时的 x 向塑性
应变随时间变化曲线

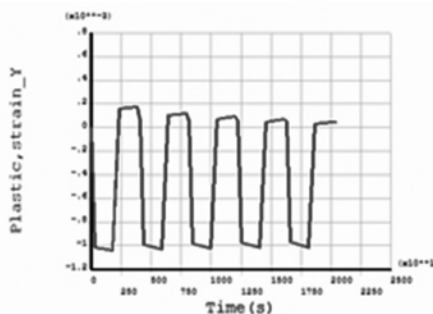


图 9 采用 10Sn90Pb 焊料时的 y 向塑性
应变随时间变化曲线

(3) 应变率敏感指数 m 的影响

为了考察应变率敏感指数 m 的影响, 将 60Sn40Pb 焊料的 Anand 黏塑性模型的材料参数 m 人为地改为由 0.303 变为 0.100, 其它条件不变, 计算此时的塑性应变, 并将应变结果与未改变参数时的结果进行对比. Von Mises 塑性应变云图如图 10 所示. 可以看出 m 变小后, 塑性应变值明显减小, 请注意, 两者应变最大值发生的部位是不同的.

图 11 和图 12 分别为 x 向和 y 向塑性应变随时间变化曲线. 结果证明 m 值的变化没有改变应变围绕 0 幅值的波动趋势, 只是改变了幅值. 所以, 选用较小应变率敏感指数的焊料可以有效地减小塑性应变.

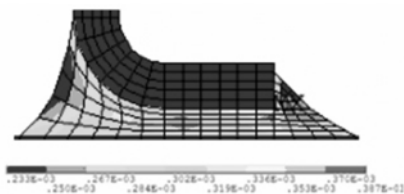


图 10 $m=0.1$ 时的 Von Mises 塑性应变云图

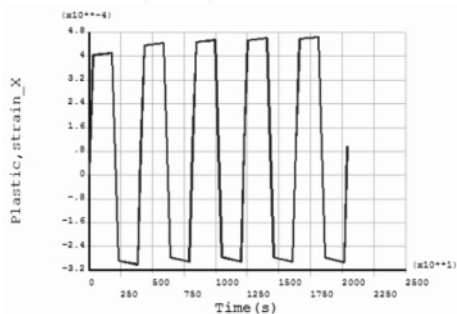


图 11 $m=0.1$ 时的 x 向塑性应变随时间变化曲线

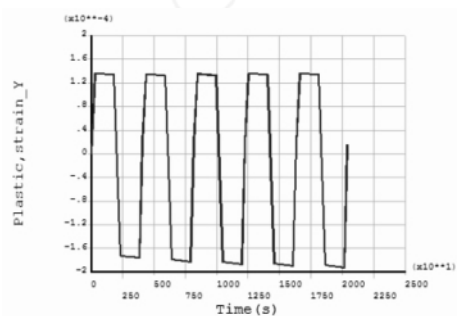


图 12 $m=0.1$ 时的 y 向塑性应变随时间变化曲线

(4) 温度变动范围的影响

采用 60Sn40Pb 焊料, 令 FR-4 板厚度为 1 cm, 施加温度加载条件 (2). Von Mises 塑性应变云图如图 13 所示. 很明显, 温度变化幅度小导致塑性应变减小. 这说明尽量采用散热等手段减少温度变化范围是非常必要的.

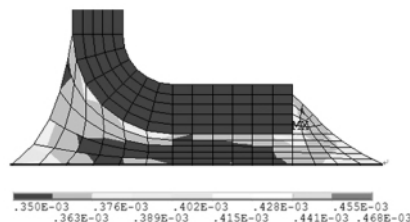


图 13 加载条件 (2) 作用下的 Von Mises 塑性应变云图

当前加载形式下的 x 向和 y 向塑性应变随时间变化曲线如图 14 和图 15 所示. 从以上结果可以看出, 塑性应变的结果随时间的变化规律与加载条件 (1) 基本相同, 只是由于载荷幅度不同而产生了一些幅值上的变化.

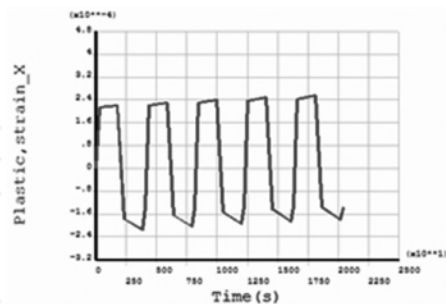


图 14 加载条件 (2) 作用下的 x 向塑性应变随时间变化曲线

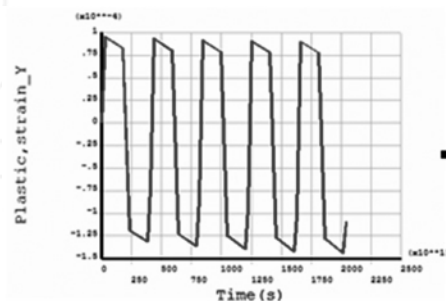


图 15 加载条件 (2) 作用下的 y 向塑性应变随时间变化曲线

3 结论

采用 Anand 黏塑性本构模型分析温度循环载荷对 QFP 电子封装元件的应变的影响. 分别考察了 FR-4 板厚度、焊料、应变敏感系数和温度变动范围的影响. 通过数值分析结果, 可以得到一些降低塑性应变的有效途径: (1) 加大 FR-4 板厚度; (2) 合理选取焊料; (3) 减小应变敏感系数; (4) 尽量降低温度变动范围.

参考文献:

- [1] 阚前华, 谭长建, 张娟, 董城. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 韩宗杰, 薛松柏, 王俭辛, 陈旭. QFP 器件半导体激光钎焊焊点力学性能和显微组织 [J]. 焊接学报, 2006, 27 (10): 41 - 44.
- [3] 张胜红. 电子封装 SnPbAg 焊层热循环可靠性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2000.
- [4] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Finite Element Analysis of QFP Structure Subjected to Circular Heat

HONG Jia - di¹, ZHANG Yuan - cai²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering; 2. School of Vocational Education and Technology,
East China Jiaotong University Nanchang 330013, China)

Abstract: Circular heat loadings lead to plastic deformation of QFP package structures. To increase the reliability of QFP package structures, some measures should be sought. In this paper, FEM technique is used to investigate the influence of FR - 4 plate thickness, solders, strain rate sensitivity of stress and variation range of temperature. According to the numerical results, some advice is given to reduce the plastic deformation of QFP solders subjected to circular heat.

Key words: QFP; package electron; FEM; circular heat; plastic strain

(责任编辑: 刘棉玲)

(上接第 122 页)

参考文献:

- [1] 安鸿志, 陈敏. 非线性时间序列分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [2] Hwang S Y, Mi - Ja Woo. Threshold ARCH(1) processes: asymptotic inference [J]. Statistics & Probability Letters, 2001 (53): 11 - 20.
- [3] Ha J, Lee S. Coefficient constancy test in AR - ARCH models [J]. Statistics & Probability Letters, 2002 (57): 65 - 77.
- [4] Hwang S Y, Basawa I V. Stationarity and moment structure for Box - Cox transformed threshold GARCH(1, 1) processes [J]. Statistics & Probability Letters, 2004 (68): 209 - 220.
- [5] Hwang S Y, Tae Yoon Kim. Power transformation and threshold modeling for ARCH innovations with applications to test for ARCH structure [J]. Stochastic Processes and their Applications, 2004 (110): 295 - 314.
- [6] 盛昭瀚, 王涛, 刘德林. 非线性时间序列模型的稳定性分析 - 遍历性理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

Geometric Stability of a Threshold ARMA - ARCH Model with Delay

WANG Yun - yan, TANG Ming - tian

(Faculty of Science, Jiangxi University of Sciences and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In this article, a new class of threshold ARMA - ARCH model with random delay is proposed. Its limited behavior is discussed and the sufficient condition for its convergence is obtained. This paper makes threshold ARMA - ARCH model with fixed time delay to threshold ARMA - ARCH model with random time delay, so it can better imitate many substantial problems in the real world. On the other hand, this paper popularizes the ARCH model, which makes the model more adaptive to improve application to phenomena of price behavior fluctuation in financial market.

Key words: Markov chains; random delay; limited behavior; geometric stability

(责任编辑: 周尚超)