

文章编号: 1004-0609(2003)04-0893-06

EBGA 焊点形态预测与可靠性分析^①

褚卫华, 陈 循, 陶俊勇, 王 考
(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于能量最小原理对装配后的 EBGA 焊点形态进行了预测。采用统一型粘塑性 Anand 本构方程描述了 Sn63Pb37 合金的粘塑性力学行为, 采用非线性有限元方法研究了 EBGA 焊点在热循环条件下的应力应变过程及其特殊性, 应用基于能量和损伤累积的 Darveaux 方法预测了 EBGA 焊点的热循环寿命。

关键词: 可靠性; 焊点; 形态预测; 热疲劳寿命; 非线性有限元分析; 粘塑性

中图分类号: TG 404

文献标识码: A

在密度电子封装 BGA 技术中, 为了改善器件散热和工作性能, 适应 PLD、ASIC、DSP 以及微处理器等一些高功率(> 6 W)和 高频(几百 MHz 以上)器件的需要, 特殊结构形式的 EBGA (enhanced BGA) 封装技术得到了越来越广泛的应用。EBGA 直接将芯片粘接在金属散热层上, 热量经粘接层直接传输到外界, 向下设计的封装腔可缩短信号传输路径, 再加上电源层和地线层分离的多层基板结构, 进一步减小了线路对高频信号传输的干扰。由于这种封装形式的器件结构复杂, 材料类型多样, 工作期间发热量大, 在功率耗散和交变的环境温度作用下, 因器件、焊点和 PCB 板材料的热膨胀失配导致 SnPb 焊点内产生交变的应力应变场引起裂纹萌生与扩展, 所以 EBGA 焊点热疲劳成为一个非常关键的问题。

本文作者以高性能计算机高速互连网络接口 EBGA 器件为研究对象(图 1), 根据焊点形态能量控制方程, 对焊点形态进行了模拟。进而采用统一的粘塑性本构方程描述焊点的力学行为, 建立了非线性有限元模型, 对焊点在热循环条件下的应力应变动态分布情况进行了分析, 最后, 应用基于能量疲劳模型的 Darveaux 方法对焊点热疲劳寿命进行了预测。

1 焊点形态预测

EBGA 焊点形态是在再流焊焊接过程中钎料受热融化以后沿金属表面润湿铺展冷凝以后形成的具

有一定形状的焊点外观形态。最小能量原理认为: 焊点最终形态是熔融钎料和与其接触的固、气相所组成系统总势能最小时的准平衡状态。

1.1 焊点形态预测能量控制方程

在焊点成形过程中, 焊点总能量(E)是界面势能(E_s)、自身重力势能(E_g)和外力作用势能(E_f)之

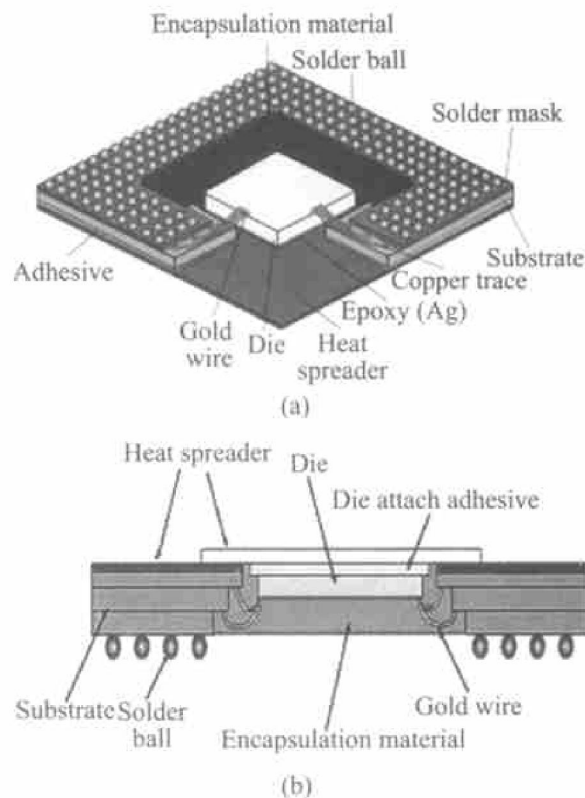


图 1 EBGA 封装结构 (a) 和剖面图 (b)

Fig. 1 Structure of EBGA device (a) and its cross-section (b)

① 收稿日期: 2003-01-10; 修订日期: 2003-04-02

作者简介: 褚卫华(1968-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 褚卫华, 博士研究生; 电话: 0731-4573394; E-mail: nudt_cwh123@163.com

和, 即:

$$E = E_s + E_g + E_f \quad (1)$$

其中

$$E_s = \int_A \sigma_{g/l} dA + \int_{A_1} \sigma_{l/s} \sigma_{l/s} dA + \int_{A_2} \sigma_{l/s} dA \quad (2)$$

$$E_g = \iiint_V \rho g z dv \quad (3)$$

$$E_f = Fh \quad (4)$$

式中 $\sigma_{g/l}$ 、 $\sigma_{l/s}$ 表示气/液、液/固界面比表面自由能, A_1 、 A_2 为熔融钎料与上、下焊盘的接触面积, ρ 为熔融钎料密度, g 为重力加速度, z 为焊点高度坐标, F 为 EBGA 器件重力作用在各焊点上的压力, h 为焊点高度。

根据不同相界面势能计算方法和杨氏方程, 可以推得

$$E_s = \int_A \sigma_{g/l} dA + \int_{A_1} -\sigma_{g/l} \cos \theta_1 dA + \int_{A_2} -\sigma_{g/l} \cos \theta_2 dA \quad (5)$$

式中 θ_1 、 θ_2 为熔融钎料与上、下焊盘的润湿角。

因此, 焊点 3 相系统的总能量为

$$E = E_s + E_g + E_f = \int_A \sigma_{g/l} dA + \int_{A_1} -\sigma_{g/l} \cos \theta_1 dA + \int_{A_2} -\sigma_{g/l} \cos \theta_2 dA + \iiint_V \rho g z dv + Fh \quad (6)$$

系统最小能量可描述为

$$\min E = \min \left(\int_A \sigma_{g/l} dA + \int_{A_1} -\sigma_{g/l} \cos \theta_1 dA + \int_{A_2} -\sigma_{g/l} \cos \theta_2 dA + \iiint_V \rho g z dv + Fh \right) \quad (7)$$

该式为焊点形态的能量控制数学模型。

由于焊点钎料量的体积在焊接过程中恒定 (V_0), 则给定的约束条件为

$$\iiint_0 dv - V_0 = 0 \quad (8)$$

1.2 焊点形态预测的程序实现

焊点形态预测是由美国 Minnesota 大学国家科学和几何结构计算与可视化技术研究中心研究开发的 Surface Evolver 软件完成的, 通过使系统总势能最小预测液态最终形态^[1], 实现过程中须将重力势能等的体积分转换为二维的焊点面积分和线积分。

设 A 是一个定向平面, $\mathbf{w} = M(x, y)\mathbf{i} + N(x, y)\mathbf{j}$ 是一个矢量场, 则据格林公式: $\oint_L \mathbf{w} d\mathbf{l} =$

$\iint_A \left(\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y} \right) dx dy$ 可将上、下焊盘的固/液和焊球周围汽/液两相界面能表示为

$$E_s = \iint_A T dA = \oint_L T \mathbf{xj} \cdot d\mathbf{l} \quad (9)$$

式中 T 为焊点的等效界面张力, 对于上、下焊盘 T 分别为: $-\sigma_{g/l} \cos \theta_1$ 和 $-\sigma_{g/l} \cos \theta_2$

对于重力势能

$$E_g = \iiint_V \rho g z dv \quad (10)$$

引入哈密顿算子:

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (11)$$

取矢量场 $\mathbf{F} = \rho g z \mathbf{i}$, 则 $\nabla \cdot \mathbf{F} = \text{div} \mathbf{F}$, 得

$$E_g = \iiint_V \rho g z dv = \iiint_V \text{div} \mathbf{F} dv = \oiint_A \rho g z \mathbf{i} \cdot d\mathbf{A} \quad (12)$$

另外, 焊点的体积可表示为

$$V_c = \iiint_V 1 dv \quad (13)$$

设: $\mathbf{F}(x, y, z) = \frac{x}{3}\mathbf{i} + \frac{y}{3}\mathbf{j} + \frac{z}{3}\mathbf{k}$, 则该矢量

函数的散度为: $\text{div} \mathbf{F} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$, 则据 Gauss 公式可得

$$\oiint_A \left(\frac{x}{3}\mathbf{i} + \frac{y}{3}\mathbf{j} + \frac{z}{3}\mathbf{k} \right) d\mathbf{A} = \iiint_V 1 dv \quad (14)$$

所以, 焊点体积可表示为

$$V_c = \iiint_V 1 dv = \oiint_A \left(\frac{x}{3}\mathbf{i} + \frac{y}{3}\mathbf{j} + \frac{z}{3}\mathbf{k} \right) \cdot d\mathbf{A} \quad (15)$$

参数选择见表 1, 可得到如图 2 所示的预测结果。

表 1 焊点形态预测输入参数

Table 1 Input parameters for predicting solder joints shape

$\sigma_{g/l}/$ mN	$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_1, \theta_2/$ ($^\circ$)	$F/$ μN	$g/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	Radius of copper pad/ mm
4.90	8.34	12	229.256	980	0.35

2 材料模式选择与有限元模型建立

材料规格为 35 mm × 35 mm, 焊点直径为 0.75 mm, 间距为 1.27 mm 的 26 × 26 阵列的 EBGA 封装器件。器件通过再流焊组装在 1.78 mm 厚的 PCB 板上, 在 PCB 板和器件侧焊盘设计分别采用 NSMD 和 SMD 形式, 焊接保护膜厚 0.08 mm, 焊盘

半径为 0.35 mm, 具体结构见图 1 和图 3。

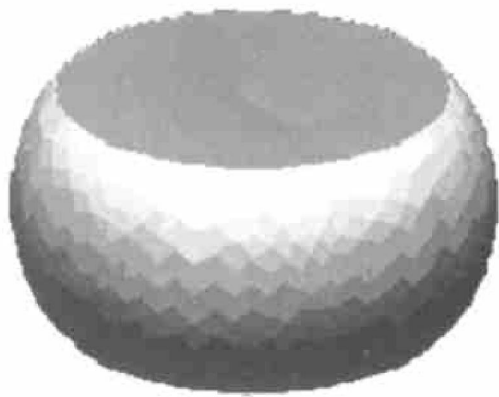


图 2 用 Surface Evolver 对 EBGA 焊点形态预测的结果

Fig. 2 Solder joint shape of EBGA device predicted by Surface Evolver

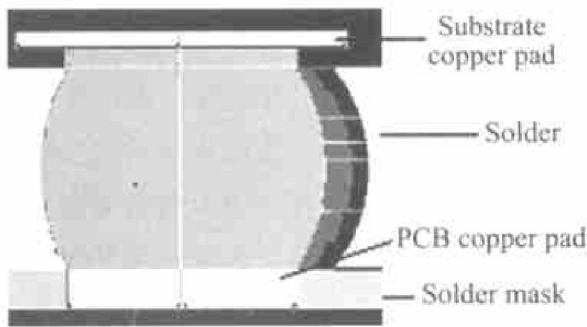


图 3 装配后焊点局部结构图

Fig. 3 Schematic of assembled solder joint

2.1 SnPb 钎料合金的本构方程

EBGA 焊球材料为 Sn63Pb37 共晶合金, 这种钎料的熔点较低(约为 183 ℃, 即 456 K), 美国军标规定的热循环试验温度范围- 55~ + 125 ℃, 相当于其熔点的 0.48~ 0.87 倍, 这种钎料合金在服役和温循环试验条件下的变形行为与时间和温度有关, 具有明显的蠕变和超塑性特征。

对 SnPb 钎料非弹性形变处理比较常用的方法是把与时间无关的塑性应变和与时间相关的蠕变应变分开处理^[2, 3]。因塑性变形和蠕变均产生于同一机制, 这种方法没有考虑蠕变与塑性变形的交互作用, 采用这种方式描述 SnPb 材料的本构关系具有一定的局限性。Darveaux 最早发现统一的 Anand 粘塑性本构方程能很好地描述 SnPb 钎料的塑性变形行为, 并通过各种加载率和温度条件下的试验确定了 Anand 本构方程的材料参数。由于其理论先进性, 目前在电子器件焊点可靠性研究方面得到了广泛的应用^[4~6]。

Anand 模型有两个基本特征: 1) 在应力空间没有明确的屈服面; 2) 采用单一内部变量(形变阻抗 s) 描述材料内部各向同性强化时对宏观塑性流动的

平均阻抗。Anand 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, 以及应变率历史效应、应变硬化和动态回复等特征, 它包括一个流动方程和 3 个用来表示材料应变硬化和应变软化的演化方程, 具体描述形式如下:

流动方程

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = A \left(\sqrt[m]{\sinh\left(\frac{\xi\sigma}{s}\right)} \right) \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right) \quad (16)$$

演化方程

$$\frac{ds}{dt} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \frac{d\epsilon}{dt} \quad (17)$$

$$B = 1 - \frac{s}{s^*} \quad (18)$$

$$s^* = s^{\wedge} \left[\frac{d\epsilon/dt}{A} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \right]^n \quad (19)$$

式中 $d\epsilon_p/dt$ 为等效塑性应变率, Q/k 为 Boltzmann 激活能常数, A 为常数, ξ 为应力乘子, σ 为等效应力, h_0 为硬化常数, s_0 为初始变形阻抗值, s^* 为 s 的饱和值, $s^{\wedge}$ 为系数, T 为绝对温度, m 为应变速率敏感指数, a 为应变速率硬化敏感指数, n 为饱和值应变速率敏感指数。经 Darveaux 试验后推荐的各参数值如表 2 所列^[4~6]。

表 2 SnPb 钎料粘塑性 Anand 模型的材料参数

Table 2 Viscoplastic material parameters of SnPb eutectic solder for Anand model

s_0/MPa	$\frac{Q}{R}/\text{K}^{-1}$	A/s^{-1}	ξ	h_0/MPa	M	$s^{\wedge}/\text{MPa}$	n	a
12.41	9 400	4.0E6	1.5	1 378.95	0.303	13.79	0.07	1.3

2.2 有限元模型

建立组装 BGA 器件的 3D 有限元模型的方法有很多种, 其中取对角线切片的方法因为兼顾精度和计算时间而被广泛地应用。模型包括了 PCB 板、PCB 焊接保护模、铜盘、焊球、器件基板、硅片、硅片粘接层、塑料封装和散热金属片等各个组成部分, PCB 板长度取器件的 1.25 倍, 有关线性和非线性、弹性与塑性以及与时间和温度有关的材料特性参数^[7]如表 3 所列。采用 Ansys 有限元软件模拟热循环加载条件下焊点热应变行为, SnPb 的钎料单元类型为粘塑性单元 VISCO107, 其它部分均采用 SOLID45 单元, 网格划分后的模型与所施加的边界条件如图 4 所示。模型加载按照美军标热循环试验条件: 温度范围为- 55~ 125 ℃, 升降温时间为 15 min, 高低温保温时间为 15 min, 零应力参考温度取 20 ℃。

3 焊点在热循环激励下应力应变响应与寿命预测

图 5 所示是 EBGa 焊点在第 4 循环周期结束时的等效塑性应变分布情况,从图中可以看出,由于 EBGa 这种结构的特殊性,它与一般 BGA 应力应变分布有所不同,位于器件基底最外侧和最内侧的焊球塑性变形情况比较严重,中间两焊球塑性变形较小,其中外侧焊球与器件基底的交界处塑性变形最大,因此将外侧焊球作为可靠性分析的主要对象。焊球在整个变形过程中,塑性变形占主导地位,比弹性应变大 2~ 3 个数量级,塑性变形在焊球疲劳失效过程中起主要作用。图 6 所示是第 4 循环周期某点等效非弹性应变—等效应力关系曲线,从图中可以看出,高应力发生在低温- 55 ℃开始时刻,高温保温阶段应力较低,在高、低温保温阶段都有明显的应力松弛现象。在热循环加载过程中塑性变形在升温、降温 and 高温保温阶段累积量明显,其中高温保温阶段累积量最为显著,低温阶段塑性变形累

积量最小。这是由于粘塑性应变过程是时间效应的热激活过程^[11~13],钎料的蠕变和温度、应力水平有关,低温阶段虽然应力值大,但温度较低。在高温阶段,由于器件尺寸大,弹性变形量大,器件基底在高温能长时间保持对焊点作用,使其保持基本恒定的高塑性应变率,这不同于一般其它 BGA 研究的结论,因此大 BGA 器件可通过缩短低温保温时间,适当延长高温保持时间来增加单循环周期塑性变形累积量以减少热循环次数,提高试验效率。

图 7 所示是外侧焊球左上侧塑性变形最严重点的塑性应变曲线。图 8 所示是焊点热循环过程中的应力—应变迟滞环,可以看出:塑性变形在第 3、4 循环周期已经达到稳定状态,且应力应变关系呈现棘轮现象,应力循环导致应变的不断累积。由于等效非弹性应变的最大位置位于外侧焊球的左上角,是疲劳裂纹的萌生地点,因此可以以最外侧焊球与器件基板交界节点的第 4 热循环周期的塑性应变情况为基础,进行 EBGa 可靠性分析和寿命预测。

采用基于每循环周期沿关键失效界面的累积平

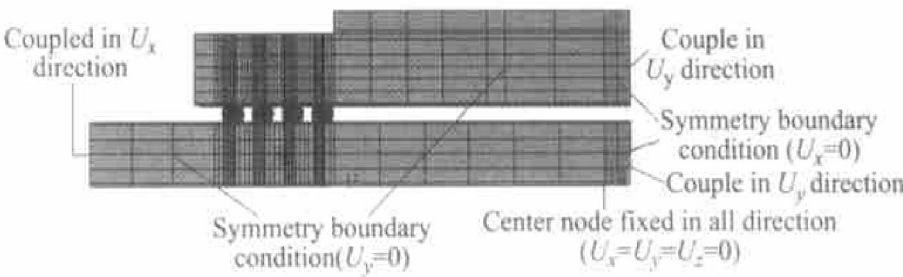


图 4 有限元分析模型与边界约束示意图
Fig. 4 Finite element model with boundary conditions

表 3 有限元模型中材料的特性常数

Table 3 Material properties used in finite element model

Material	E/GPa	G/MPa	$\text{CTE}/10^{-6}\text{K}^{-1}$	Poisson ratio
Sn63Sb37	75.482- 0.152 <i>T</i>		24.5	0.350
Copper	120.658		17	0.345
Substrate mask	3.999		35	0.400
Substrate core (BT)	15.168		13(<i>X</i> , <i>Y</i>)	0.195
			57(<i>Z</i>)	
Die attach adhesive	7.377		52	0.300
Die	130.311		2.6	0.278
Adhesive	1.500		52	0.400
Aluminium	69.000		24	0.340
PCB mask	4.137		30	0.400
PCB core FR4	27.924+0.037 <i>T</i> (<i>X</i> , <i>Y</i>)	12.600+0.016 <i>T</i> (<i>XY</i>)	16(<i>X</i> , <i>Y</i>)	0.39(<i>XZ</i> & <i>YZ</i>)
	12.204+0.016 <i>T</i> (<i>Z</i>)	5.500+0.007 3 <i>T</i> (<i>YZ</i> & <i>XZ</i>)	84(<i>Z</i>)	0.110(<i>XY</i>)
Encapsulation material	15.513		15.0	0.250



图 5 SnPb 焊点等效塑性应变分布图

Fig. 5 Equivalent plastic strain distribution in SnPb solder joints

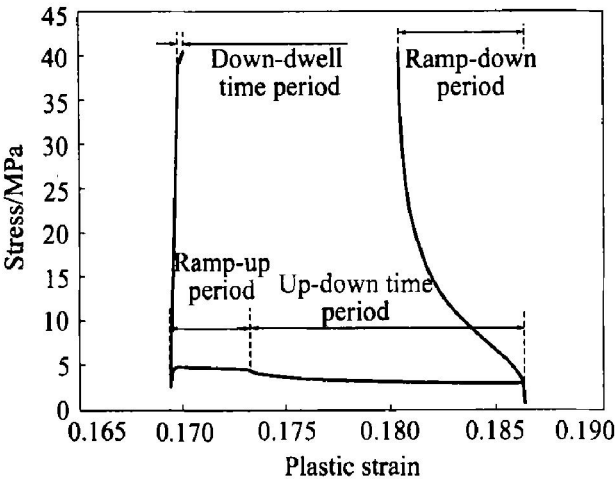


图 6 第 4 循环周期某节点
等效非弹性应变—等效应力曲线

Fig. 6 Curve of equivalent inelastic strain vs equivalent stress of certain node during the forth circle

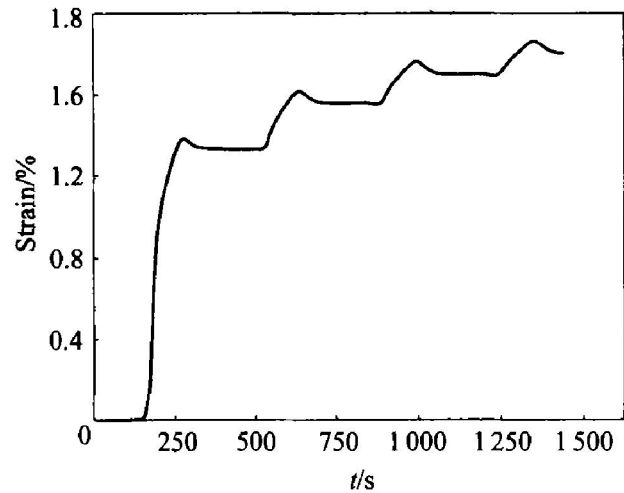


图 7 等效塑性应变随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of equivalent plastic strain vs time

均应变能密度的 Darveaux 方法来计算焊点在每温循环周期裂纹萌生和裂纹扩展率, 在此基础上预测焊点的热疲劳寿命, 其具体描述包括 4 个参数 (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) 和 3 个方程, 具体描述如下:

裂纹萌生

$$N_0 = K_1(\Delta W_{ave})^{k_2} \tag{20}$$

裂纹扩展

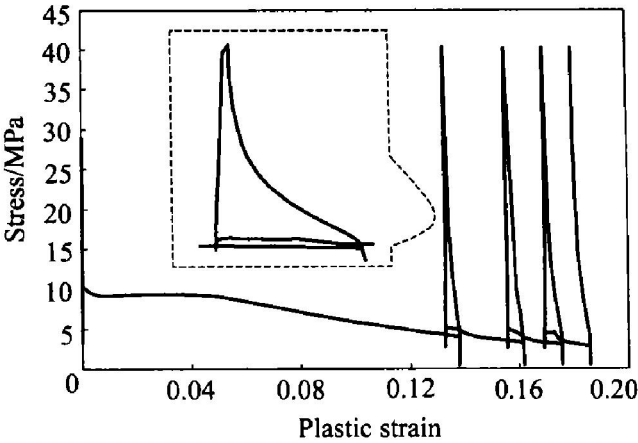


图 8 焊点某节点等效非弹性应变—
等效应力曲线(滞后环)

Fig. 8 Curves of equivalent inelastic strain vs equivalent stress of certain node(hysteresis loops)

$$\frac{d\alpha}{dN} = K_3(\Delta W_{ave})^{k_4} \tag{21}$$

总寿命

$$\alpha = N_0 + \frac{\alpha}{d\alpha/dN} \tag{22}$$

$$\Delta W_{ave} = (\sum_{i=1}^n \Delta W_i \cdot V_i) / (\sum_{i=1}^n V_i) \tag{23}$$

式中 ΔW_i 表示体积为 V_i 的第 i 个单元的塑性功密度, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 是裂纹扩展常数, α 表示特定的裂纹扩展长度, 在这里取焊球和铜盘的连接直径 0.7 mm。焊点的热疲劳寿命预测结果见表 4。

表 4 Darveaux 常数^[8~10]及预测结果

Table 4 Darveaux constants and predicted results				
K_1	K_2	K_3	K_4	Fatigue life
22 400	- 1. 52	$5. 86 \times 10^{-7}$	0. 98	2 039

REFERENCES

[1] Holub I R, Pitarresi J M, Singler T J. Effect of solder joint geometry of the predicted fatigue life of BGA solder joints [A]. Inter Society Conference On Thermal Phenomena[C]. IEEE, 1996. 187 - 191.

[2] 王国忠, 陈 柳, 程兆年. 电子封装 SnPb 钎料和底充胶的材料模型及其应用[J]. 机械工程学报, 2000, 12 (36): 33 - 38.

WANG Guo zhong, CHEN Liu, CHENG Zhao-nian. Material models for SnPb solder joints and underfill in electronic packaging and their application [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 12(36): 33 - 38.

- [3] Chandran B, Goyal D, Thomas J. Effect of package design and layout on BGA solder joint reliability of an organic C4 package[A]. Electronic Components and Technology Conference[C]. IEEE, 2000. 1205 - 1214.
- [4] Gustafsson G, Guven I, Kradinov V, et al. Finite element modeling of BGA package for life prediction[A]. 2000 Electronic Components and Technology Conference[C]. IEEE, 2000. 1059 - 1063.
- [5] Zahn B A. Finite element based solder joint fatigue life predictions for a same die stacked chip scale ball grid array package [A]. International Electronics Manufacturing Technology Symposium[C]. IEEE, 2002. 274 - 285.
- [6] ZHANG Le-lei, Chee S S, Maheshwari A, et al. Experimental and finite element analysis of cavity down BGA package solder joint reliability[A]. Electronics Packaging Technology Conference[C]. IEEE, 2000. 391 - 397.
- [7] Mawer A. Motorola Semiconductor Technical Data: Plastic Ball Grid Array(PBGA)[R]. Motorola Inc, 1996. 1 - 19.
- [8] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlations[A]. Proceedings of 50th Electronic Components & Technology Conference[C]. 2000. 1048 - 1058.
- [9] Lee W W, Nguyen L T, Selvaduray G S. Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages[J]. Microelectronics Reliability, 2000(40): 213 - 244.
- [10] Wen Sheng-min, Keer L M, Vaynman S, et al. A constitutive model for a high lead solder [J]. IEEE Transactions On The Components And Packaging Technology, 2002, 25(1): 23 - 31.
- [11] 马 鑫, 钱乙余, Yoshida F. 表面组装焊点内部应力—应变场的数值模拟(I) [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 404 - 410.
- [12] 钱乙余, 马 鑫, Yoshida F. 表面组装焊点内部应力—应变场的数值模拟(II) [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 411 - 414.
- [13] 钱乙余, MA Xin, Yoshida F. Finite element analysis of stress—strain distribution characteristics in SMT solder joints (I) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 404 - 410.
- [14] 钱乙余, MA Xin, Yoshida F. Finite element analysis of stress—strain distribution characteristics in SMT solder joints (II) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 411 - 414.
- [15] Pang J H L, Chong D Y R. Flip chip on board solder joint reliability analysis using 2D and 3D FEA models[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 10(4): 499 - 506.

Shape prediction and reliability analysis of EBGA solder joint

CHU Wei-hua, CHEN Xun, TAO Jun-yong, WANG Kao

(College of Mechatronic Engineering and Automation,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the principle of the minimum energy, the energy control equation for solder joint geometry was presented and three-dimensional geometry of the solder joint mounted on the PCB was predicted by using Surface Evolver program. The unified viscoplastic Anand constitutive equation was employed to represent the viscoplastic deformation behavior of Sn63Pb37 alloy, nonlinear finite element method was applied to study the accumulation of inelastic strain and the feature of stress—strain distribution in the solder joints under thermal cycling. At last, the thermal cycle life of EBGA solder was predicted using the energy-based and damage-based Darveaux method.

Key words: reliability; solder joint; thermal fatigue life; nonlinear finite element analysis; viscoplasticity

(编辑 黄劲松)