

CSP 封装 Sn-3.5Ag 焊点的热疲劳寿命预测*

韩 潇[†] 丁 汉 盛鑫军 张 波

(上海交通大学机械与动力工程学院 先进电子制造中心, 上海 200030)

摘要: 对芯片尺寸封装(CSP)中 Sn-3.5Ag 无铅焊点在热循环加速载荷下的热疲劳寿命进行了预测. 首先利用 ANSYS 软件建立 CSP 封装的三维有限元对称模型, 运用 Anand 本构模型描述 Sn-3.5Ag 无铅焊点的粘塑性材料特性; 通过有限元模拟的方法分析了封装结构在热循环载荷下的变形及焊点的应力应变行为, 并结合 Darveaux 疲劳寿命模型预测了无铅焊点的热疲劳寿命.

关键词: 芯片尺寸封装; 无铅焊点; Anand 本构模型; 疲劳寿命; 有限元分析

EEACC: 0170J; 0170N

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)09-1695-06

1 引言

芯片尺寸封装(chip scale package)是一种新型的高密度封装形式,已越来越广泛地应用于手机、PDA、数码相机等便携式电子产品的芯片封装中. 电子产品在使用过程中会经历功率散耗和环境温度的周期性变化,由于封装结构中各种材料的热膨胀系数失配,起连接作用的焊点必然经受应力应变的循环变化,从而引起焊点的热疲劳破坏,导致整个封装器件的失效. 因此焊点的热疲劳可靠性问题已成为电子封装领域中研究的热点问题.

焊点的热疲劳寿命预测是焊点的热疲劳可靠性研究中的难点之一. 基于有限元分析来预测焊点疲劳寿命的方法避免了以往实验方法耗时、成本高的缺点,可以用于在设计阶段对封装结构及材料进行优化,以提高封装器件的可靠性. 目前已有一些基于有限元法的焊点疲劳寿命预测方法^[1,2],其中 Darveaux^[3]提出的基于应变能量的方法使用较为普遍^[4~6]. Darveaux 将实验得到的焊点裂纹产生和裂纹扩展数据与仿真得到的焊点粘塑性应变能密度增量联系起来,把焊点的热疲劳寿命看作是裂纹初始产生的循环数与裂纹扩展循环数之和. 这一方法依赖于能精确描述焊点的时间相关塑性和时间无关塑性的本构模型,有限元分析软件 ANSYS 的材料模型中含有能描述金属时间相关塑性(粘塑性)的 Anand 本构模型, Darveaux 利用已有的 62Sn36Pb2Ag 焊点材料的蠕变实验数据修正了

Anand 模型参数来描述焊料的时间相关及时间无关塑性行为,成功预测了 62Sn36Pb2Ag 焊点的疲劳寿命. Darveaux 的方法已被应用到多种电子封装形式之中, Zahn^[5]应用这一方法实现了芯片叠层封装(stacked die package)中 63Sn37Pb 焊点的疲劳寿命预测. Lall 等人^[6]研究了塑料球栅阵列(PBGA)封装中 63Sn37Pb 焊点的热疲劳可靠性问题,他们通过实验测量 63Sn37Pb 焊点的裂纹扩展数据修改了 Darveaux 裂纹扩展常数,从而更加准确地预测了焊点的疲劳寿命.

目前焊点疲劳寿命预测主要是针对含铅焊点的,然而,随着人们环保意识的增强,有毒的含铅焊料将被禁止用于消费类电子产品,无铅焊料将取而代之,“无铅化”已成为电子工业发展的必然趋势. 而对于无铅焊料的研究目前尚处于起步阶段,虽然已有多种无铅焊料面世,但还没有公认的能取代 SnPb 焊料的无铅焊料成分. 其中由于 Sn-3.5Ag 具有较高的拉伸强度、良好的延展性和力学性能,吸引了较多研究者的关注. Chen 等人^[7]在实验的基础上提出了改进的 Anand 本构模型,从而能更准确地描述 Sn-3.5Ag 焊点的非弹性应力应变关系. Lau 和 Lee^[8]应用有限元方法分析了晶元级芯片尺寸封装(WLCSP)中 Sn-3.5Ag 无铅焊点在热循环载荷下的蠕变行为,并且研究了电路板上的微通孔对焊点可靠性的影响,但他们没有涉及无铅焊点的疲劳寿命预测.

本文运用 Anand 本构模型描述了 Sn-3.5Ag 无铅焊点的粘塑性材料特性,对芯片尺寸封装在热循

*国家自然科学基金资助项目(批准号:50575133,50390063)

[†]通信作者. Email: xiao. han @hp. com

环载荷下的应力应变行为进行了 ANSYS 有限元分析,并且应用 Darveaux 方法对无铅焊点的疲劳寿命进行了预测.

2 分析模型

2.1 结构模型及有限元模型

本文所采用的芯片尺寸封装为超细节距球栅阵列封装(VFBGA),模型实体来源于日月光公司的 CSP 产品介绍,其结构如图 1 所示^[9].封装体有 100 个焊点,呈 10 × 10 阵列分布,焊点节距为 0.75 mm.封装各组成部分的尺寸参数如表 1 所示^[5,9].

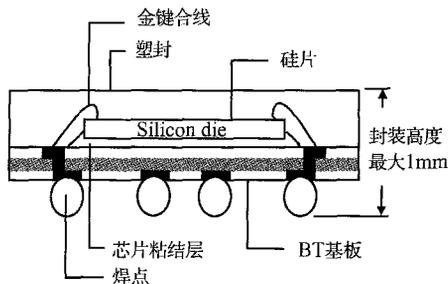


图 1 芯片尺寸封装结构简图

Fig. 1 Structural diagram of chip scale package

表 1 封装结构尺寸参数

Table 1 Dimensions of the package

塑封/(mm × mm × mm)	9 × 9 × 0.45
硅片/(mm × mm × mm)	6 × 6 × 0.1778
粘结层/(mm × mm × mm)	6 × 6 × 0.0254
基板/(mm × mm × mm)	9 × 9 × 0.21
PCB/(mm × mm × mm)	11.25 × 11.25 × 1
焊点直径、高度/mm	0.35, 0.27
基板焊盘直径、厚度/mm	0.32, 0.027
PCB 焊盘直径、厚度/mm	0.28, 0.027
基板阻焊层厚度/mm	0.03
PCB 阻焊层厚度/mm	0.04

由于封装结构的对称性,在 ANSYS 中只建立四分之一的三维有限元模型(如图 2),其中 CSP 被焊接在 PCB 电路板上,在模型的对称面上施加对称边界条件.模型全部采用六面体网格划分,由 48863 个节点和 41633 个单元组成,焊点的单元类型是 VISCO107 粘塑性实体单元,其他结构的单元类型都是 SOLID45 实体单元.

2.2 材料模型

有限元模拟的关键在于材料模型的准确性.由于焊点在室温时的温度已经超过它的熔点的二分之

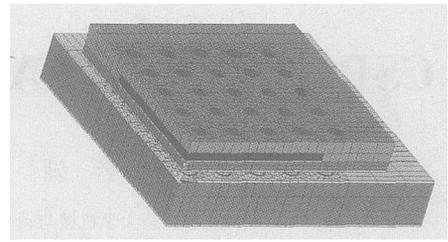


图 2 CSP 封装的三维对称有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional quarter symmetry FEA model

一,焊点的应变将由蠕变应变和塑性应变共同组成,焊点的热疲劳失效是蠕变和塑变共同作用的结果. Darveaux^[3]用 ANSYS 中内置的 Anand 粘塑性材料模型来描述 62Sn36Pb2Ag 焊料的本构关系, Chen^[7]在对 Sn-3.5Ag 无铅焊料进行力学实验的基础上得到了 Anand 模型的材料参数,从而能够合理地描述 Sn-3.5Ag 焊点在热循环条件下的时间温度相关的粘塑性行为.

Anand 本构模型包括材料非弹性流动方程以及内变量演化方程.流动方程为

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right] \left[\sinh\left(\frac{s}{s^*}\right)\right]^{1/m} \quad (1)$$

内变量 s 表示材料非弹性流动的的各向同性变形阻抗,内变量演化方程为

$$\dot{s} = \left\{ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^a \operatorname{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right\} \dot{\epsilon} \quad (2)$$

式中内变量饱和值

$$s^* = s^* \left[\frac{\dot{\epsilon}}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n \quad (3)$$

以上 Anand 模型方程中的参数值如表 2 所示^[7].

表 2 Sn-3.5Ag 无铅焊点的 Anand 模型材料参数

Table 2 Material parameters of Anand model for Sn-3.5Ag

参数	值	定义
s_0 /MPa	2.3165	变形阻抗的初始值
Q/R	10278.9	激活能/气体常数
A/s^{-1}	177016	指数前系数因子
	7	材料常数
m	0.207	应力的应变率敏感指数
h_0 /MPa	27782	应变硬化常数
\hat{s}/MPa	52.4	变形阻抗饱和值系数
n	0.0177	变形阻抗饱和值的应变率敏感指数
a	1.6	应变硬化指数

此外,封装结构中还包括其他一些材料,其中 PCB 电路板和 BT 基板被看作是各向异性材料.其他材料特性参数均取自参考文献,如表 3 所示.

表 3 封装结构的材料特性
Table 3 Material properties of the package

部件(材料)	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比	热膨胀系数/ K^{-1}	来源
焊点(Sn-3.5Ag)	$66662 - 35 T - 0.0587 T^2$	—	0.4	$(16.28 + 0.02039 T) \times 10^{-6}$	文献[8]
PCB(FR4)	27924 - 37T (X, Y) 12204 - 16 T (Z)	12600 - 16.7 T (XY) 5500 - 7.3 T (YZ&XZ)	0.39 (XZ&YZ) 0.11 (XY)	14.5×10^{-6} (X, Y) 67.2×10^{-6} (Z)	文献[6]
阻焊层	3100	—	0.3	30×10^{-6}	文献[6]
焊盘(Cu)	129000	—	0.34	16.3×10^{-6}	文献[6]
基板(BT)	17890 (X, Y) 7846 (Z)	8061 (XY) 2822 (YZ&XZ)	0.39 (XZ&YZ) 0.11 (XY)	12.42×10^{-6} (X, Y) 57×10^{-6} (Z)	文献[6]
粘结层	6769	—	0.35	52×10^{-6}	文献[6]
硅片(Si)	163000	—	0.28	2.5×10^{-6}	文献[6]
塑封	23520	—	0.3	15×10^{-6}	文献[6]

注：T 为开氏温度。

2.3 热循环载荷条件

根据实际热循环条件^[5]确定温度变化范围是 - 40 ~ 125 ,升降温时间各为 15min ,高低温保持时间也各为 15min ,参考温度设为 125 ,假设所有结构初始应变为零.由于疲劳寿命预测通常需要模拟两到三个热循环来得到每循环累积的粘塑性应变能密度增量^[3],本文中模拟封装体经历三个热循环周期的变化过程,施加的温度载荷如图 3 所示.

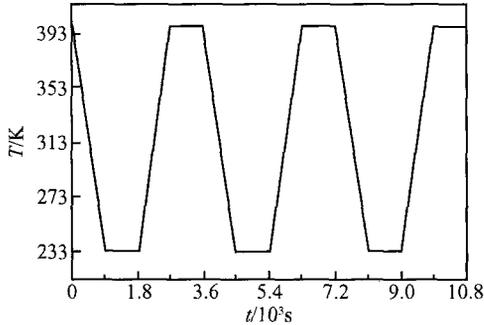


图 3 温度载荷
Fig. 3 Temperature load

3 计算结果分析

图 4 为 900s 降温结束时封装体以及对角线焊点的变形图(放大 10 倍),其中焊点的显示顺序为从左至右,依次是从封装体的中心到边角位置变化.从图 4(a)可以看出,封装整体的体积缩小,这是由于降温冷却的影响.从图 4(b)可以看出,边角焊点的变形最大,而且是倾斜变形,究其原因,是因为冷却时 PCB 和基板都向中心收缩,而 PCB 比基板的热膨胀系数稍大,PCB 板的收缩量较大,基板的收缩量较小,焊点上下界面的变形不一致,因而焊点受到剪切力的作用,产生剪切变形,离中心最远的边角焊点变形量必定最大.这时焊点的最大 von Mises 等

效力发生在边角焊点与基板焊盘相连的一侧,如图 5 所示.

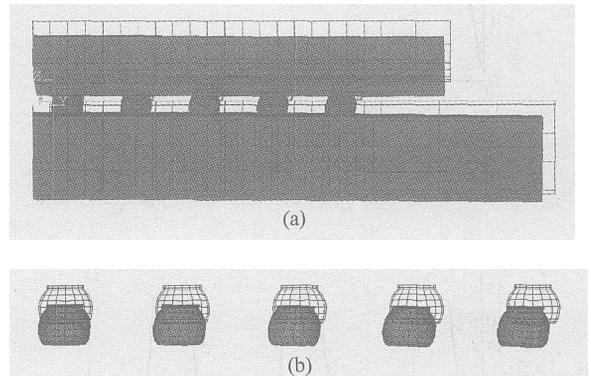


图 4 900s 时 CSP 封装体变形图(a)和对角线焊点变形图(b)
Fig. 4 Deformation of CSP package (a) and diagonal solder joints (b) at 900s

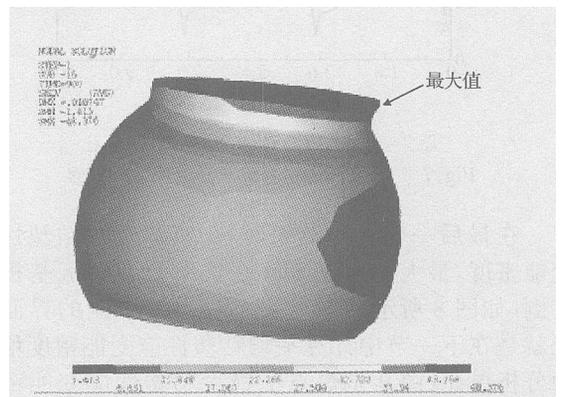


图 5 900s 时边角焊点的 von Mises 应力云图
Fig. 5 Von mises stress of corner solder joint at 900s

在 10800s 三个热循环结束时,考察焊点的最大等效塑性应变,也是发生在边角焊点与基板焊盘相连的一侧,因此可以预测这一侧将是焊点裂纹最先产生的地方.焊点的最大等效塑性应变随时间变化的曲线如图 6 所示,由图中可以看出焊点的等效塑性应变是一个循环累积的过程,一直到焊点完全断

裂.在温度保持阶段,等效塑性应变的变化主要是由蠕变引起的.图7是焊点的 von Mises 等效应力的时间历程曲线,从图中可以看出温度下降时焊点应力增大,温度上升时焊点应力减小,这是由封装体的零应变初始状态为高温所决定的.由图中还可以看出应力在保温阶段有所下降,这较为确切地模拟了焊点材料在温度不变的情况下发生蠕变时的应力松弛效应,验证了 Anand 模型能够合理描述无铅焊点的材料特性.

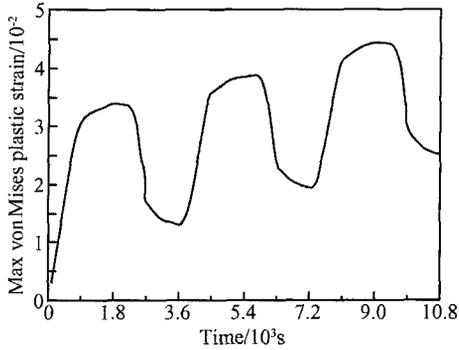


图 6 焊点的最大等效塑性应变和时间的关系

Fig. 6 Time history of Max von Mises plastic strain

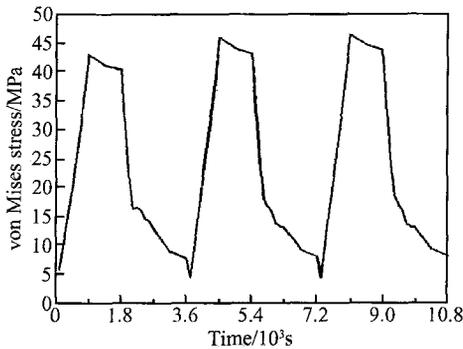


图 7 焊点的等效应力和时间的关系

Fig. 7 Time history of von Mises stress

在最后一个循环结束时,观察焊点的粘塑性应变能密度,最大值也是发生在边角焊点靠近基板的一侧(如图8所示),因此边角焊点这一侧的界面单元就是在下一节中计算平均粘塑性应变能密度增量的分析单元.图9是焊点上最大粘塑性应变能密度随时间的变化曲线,从图中可以看出焊点的粘塑性应变能密度是一个逐渐上升的过程,而且每循环的增量基本相同.

4 疲劳寿命预测

Darveaux^[3]通过大量实验测量了实际焊点的裂纹扩展数据,将有限元计算得到的焊点的平均粘塑性应变能密度增量 W_{ave} 和实验得到的焊点裂纹初

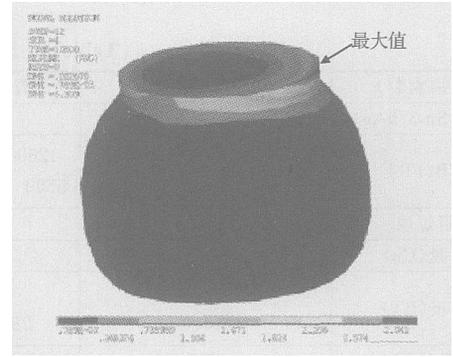


图 8 焊点的粘塑性应变能密度

Fig. 8 Viscoplastic strain energy density of solder joint

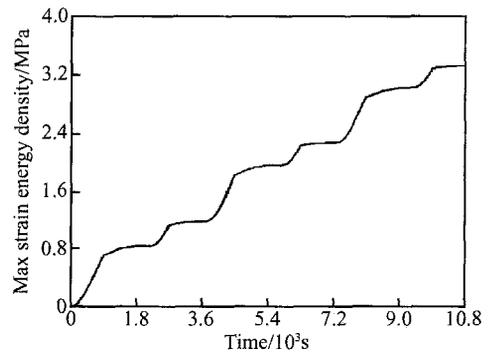


图 9 最大粘塑性应变能密度和时间关系

Fig. 9 Time history of Max. viscoplastic strain energy density

始产生的循环数 N_0 以及裂纹扩展速率 da/dN 的关系用以下两个方程拟合,得到四个裂纹扩展相关常数(如表4所示),从而实现了利用有限元计算结果就可以预测焊点的热疲劳寿命.

$$N_0 = K_1 (W_{ave})^{K_2} \tag{4}$$

$$\frac{da}{dN} = K_3 (W_{ave})^{K_4} \tag{5}$$

表 4 Darveaux 裂纹扩展相关常数

Table 4 Correlation constants of Darveaux crack growth			
K_1	K_2	K_3	K_4
56300	- 1.62	3.34×10^{-7}	1.04

焊点的特征疲劳寿命 w (即失效概率为 63.2% 时的循环数)可以通过将裂纹初始产生的循环数和裂纹沿焊点连接界面扩展的循环数累加得到,如方程(6)所示,式中 a 为焊点在界面处的直径

$$w = N_0 + \frac{a}{da/dN} \tag{6}$$

在计算 W_{ave} 时应当注意, W_{ave} 是焊点连接界面厚度范围内的单元体积均化的粘塑性应变能密度增量.参考文献[5],焊点和基板焊盘及 PCB 焊盘连

界面处的厚度为 0.0254mm(包含两层单元),如图 10 所示.由于单元体积对应变能密度大小有影响,所以需对界面单元的粘塑性应变能密度进行单元体积均化处理,体积均化可在 ANSYS 后处理中完成. W_{ave} 的计算步骤如下:(1)选择具有最大粘塑性应变能密度的焊点连接界面处的两层单元作为分析单元;(2)使用 ETABLE 单元表命令可以得到每一循环结束时这些单元的体积 V_i 和粘塑性应变能密度 W_i ,按公式(7)计算每循环结束时这些单元的平均粘塑性应变能密度;(3)用最后一个循环的平均粘塑性应变能密度减去前一个循环的平均粘塑性应变能密度就是平均粘塑性应变能密度增量 W_{ave} .单元体积均化得到的最后一个循环的平均粘塑性应变能密度增量为 0.1882MPa,而没有进行单元体积均化得到的最后一个循环的最大粘塑性应变能密度增量为 0.7397MPa.由于 Darveaux 裂纹扩展相关常数使用的是英制单位,所以必须将 W_{ave} 的单位由 MPa 换算成 psi ($1\text{psi} = 6.894757 \times 10^{-3}\text{MPa}$),将焊点连接界面直径的单位由 mm 换算成 inch ($1\text{inch} = 25.4\text{mm}$).将这些值代入方程(4)~(6)就可以得到焊点的特征疲劳寿命.

$$W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (7)$$

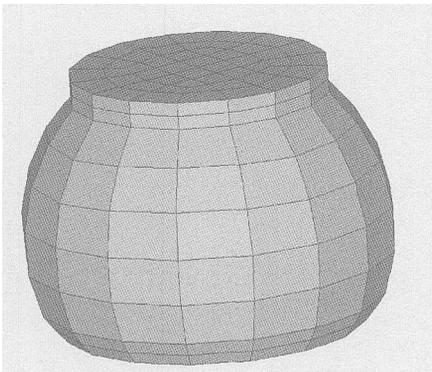


图 10 焊点的有限元网格划分
Fig. 10 Finite element mesh of solder joint

仿真模拟三个热循环载荷之后的计算结果如表 5 所示,为分析界面单元体积均化对结果所带来的影响,分别对单元体积均化和不进行单元体积均化两种情况下焊点的热疲劳寿命进行了预测,结果表明不均化情况下的预测误差远远大于均化后的预测误差.单元体积均化后得到的无铅焊点的特征疲劳寿命是 1174 个循环,与实际产品介绍中公布的特征疲劳寿命 1775 个循环相比,预测寿命少了 33.86%.在 Darveaux 疲劳寿命模型的预测精度 $\pm 50\%$ 范围之内^[3],证明了 Darveaux 疲劳寿命模型

可以用于无铅焊点的寿命预测.

表 5 疲劳寿命预测结果
Table 5 Fatigue life prediction results

是否进行单元体积均化	是	否
W/MPa	0.1882(27.30psi)	0.7397(107.28psi)
a/mm	0.24(0.00945in)	0.24(0.00945in)
N_0 /cycle	266	29
$(da/dN)/(in/cycle)$	1.04077×10^{-5}	4.32002×10^{-5}
w/cycle	1174	248
预测误差/%	-33.86	-86.03

5 结论

本文通过有限元分析研究了芯片尺寸封装中 Sn-3.5Ag 无铅焊点的热疲劳可靠性问题,并且运用 Darveaux 疲劳寿命模型预测了焊点的疲劳寿命.得到以下结论:

(1)在热循环过程中,焊点的最大等效塑性应变以及最大粘塑性应变能密度都是发生在边角焊点靠近基板焊盘的界面处,因而预测该界面将是焊点首先出现裂纹的地方.

(2)从模拟得到的焊点的等效应力及等效塑性应变时间历程图中可以看出,Anand 本构模型能够合理地模拟 Sn-3.5Ag 焊点的时间温度相关的粘塑性材料特性.

(3)通过 Darveaux 疲劳寿命模型预测的焊点寿命结果在模型的预测精度范围之内,如果可以通过实验测得 Sn-3.5Ag 焊点的裂纹扩展数据,然后修正 Darveaux 裂纹扩展相关常数,将可以得到更加精确的预测结果.

参考文献

[1] Lee W W, Nguyen L T, Selvaduray G S. Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale package. Microelectron Reliab, 2000, 40: 231

[2] Xu Yangjian, Liu Yong, Liang Lihua, et al. Life prediction for solder joint interconnect in the package—strain energy density methodology and effective strain methodology. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(2): 279(in Chinese) [许杨剑, 刘勇, 梁利华, 等. 芯片封装焊球连接疲劳寿命预测分析——能量法和有效应变法之比较. 应用力学学报, 2005, 22(2): 279]

[3] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation. Proceedings of 50th Electronic Components and Technology Conference, 2000: 1048

[4] He Ping, Peng Yaowei, Wu Jianbo, et al. Solder joint fatigue reliability of vf-BGA package. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(7): 874(in Chinese) [和平, 彭瑶玮, 乌健波, 等. vf-BGA 封装焊球热疲劳可靠性的研究. 半导体学报, 2004, 25(7): 874]

[5] Zahn B A. Finite element based solder joint fatigue life predictions for a same die size-stacked-chip scale-ball grid array

- package. Proceedings of SEMI/IEEE International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2002:274
- [6] Lall P, Islam M N, Singh N, et al. Model for BGA and CSP reliability in automotive underhood applications. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(3) :585
- [7] Chen X, Chen G, Sakane M. Prediction of stress-strain relationship with an improved Anand constitutive model for lead-free solder Sn-3. 5Ag. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(1) :111
- [8] Lau J H, Lee S W R. Modeling and analysis of 96. 5Sn-3. 5Ag lead-free solder joints of wafer level chip scale package on buildup microvia printed circuit board. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2002, 25(1) :51
- [9] Ase Kaohsiung. CSP VFBGA. 2005. [http: www.asetwn.com.tw/content/2-4-1.html](http://www.asetwn.com.tw/content/2-4-1.html). Cited 20 Jan 2006

Thermal Fatigue Life Time Prediction of Sn-3. 5Ag Lead-Free Solder Joint for Chip Scale Package *

Han Xiao[†], Ding Han, Sheng Xinjun, and Zhang Bo

(Advanced Electronic Manufacturing Center, School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract : The thermal fatigue life time of Sn-3. 5Ag lead-free solder joint of a chip scale package subjected to a thermal cycling load is predicted. Using the finite element analysis software ANSYS, a three dimensional symmetric model of the chip scale package is established, which uses the Anand constitutive model to describe the viscoplastic material property of Sn-3. 5Ag lead-free solder joints. The deformation of the CSP package and the stress-strain variation of the solder joint under a thermal cycling load are investigated through thermal stress analysis. The Darveaux fatigue life prediction method is used to calculate the fatigue life time of the lead-free solder joint based on the finite element simulation results.

Key words : chip scale package; lead-free solder joint; Anand constitutive model; fatigue life; finite element analysis

EEACC : 0170J ; 0170N

Article ID : 0253-4177(2006)09-1695-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50575133, 50390063)

[†] Corresponding author. Email: xiao.han@hp.com