

[文章编号] 1004- 0609(2001)01- 0120- 05

# 电子封装功率模块 PbSnAg 焊层热循环可靠性<sup>①</sup>

张胜红, 王国忠, 程兆年

(中国科学院 上海冶金研究所, 上海 200050)

**[摘要]** 对电子封装 IGBT 功率模块进行热循环实验, 考察了 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料焊层的热循环失效和裂纹扩展。应用超声波显微镜对裂纹扩展过程进行检测, 得到了热循环失效的裂纹扩展数据。采用统一型粘塑性 Anand 方程描述了 92.5Pb5Sn2.5Ag 的力学本构, 模拟了功率模块钎料焊层裂纹体在热循环条件下的应力应变。基于对  $\Delta J$  积分的求解, 描述了 PbSnAg 焊层热循环裂纹扩展速率。

**[关键词]** 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料; 热循环; 裂纹扩展; 粘塑性;  $\Delta J$  积分

**[中图分类号]** TG 40; O 241.82

**[文献标识码]** A

电子封装技术的发展要求电子封装(或组件)在更趋恶劣的环境下工作。例如, 为了获得更快的响应, 汽车电子的功率模块更接近于发动机, 使功率模块在较高的交变温度条件(如  $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下工作。功率模块芯片与基板(连散热器)的连接通常采用软钎料合金(如 SnPb 基合金), 在热循环条件下, 由于材料的热膨胀失配, 在钎料焊层产生交变的应力应变过程, 导致裂纹的产生和扩展, 使芯片与基板的机械/热连接失效。功率模块连接焊层的热循环失效已成为制约提高电子模块功率的一个关键因素, 引起了人们的重视<sup>[1, 2]</sup>。现有的研究方法主要采用加速疲劳实验, 并由此分析焊层的失效情况<sup>[3]</sup>, 对 SnPb 基钎料焊层失效过程的检测、裂纹扩展过程等还未见报导, 采用模拟方法研究功率模块焊层的热循环失效尚不多见<sup>[4, 5]</sup>。

目前, 对电子封装 SnPb 基钎料焊点(或焊层)可靠性的评估, 主要有两类方法: 一类采用低周疲劳的 Coffin-Manson 经验方程(即 C-M 方程); 另一类基于断裂力学方法, 采用合适的力学参量来描述裂纹扩展速率<sup>[6~8]</sup>。由于功率模块的钎料焊层面积大( $8.5\text{ mm} \times 9.3\text{ mm}$ )、厚度小( $\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ ), 此时, 热疲劳失效行为可能与采用循环应变范围的 C-M 方程描述的失效行为有所不同<sup>[4]</sup>。另外, 焊层的失效是由裂纹的产生和扩展引起的, 研究 SnPb 焊点的裂纹扩展过程, 可以提供描述裂纹扩展速率的方法, 并由此对热循环寿命进行较准确的估计。

本研究对 IGBT 功率模块进行了温度循环实验, 对 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料焊层裂纹扩展过程进

行检测, 模拟功率模块 SnPbAg 焊层裂纹体在热循环条件下的应力应变。采用力学参量  $\Delta J$  描述焊层热循环裂纹扩展速率。

## 1 实验研究

### 1.1 实验方法

图 1 是一种绝缘栅双极晶体管(IGBT)功率模块的结构示意图, 其 IGBT 功率模块采用 Cu 层直接键合(DCB)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基板, 在 DCB 基板上用 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料焊装 2 个测试芯片, 通过 Al 丝焊引线以及输入输出端形成电路。热循环实验的温度范围是  $-55 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 频率为  $1/\text{h}^{-1}$ , 升降温速率为  $18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 高低温保温时间各为 20 min。

图 2(a) 所示是 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层的微观组织, 基体相是富 Pb 相, 在基体相上分布有  $\text{Ag}_3\text{Sn}$

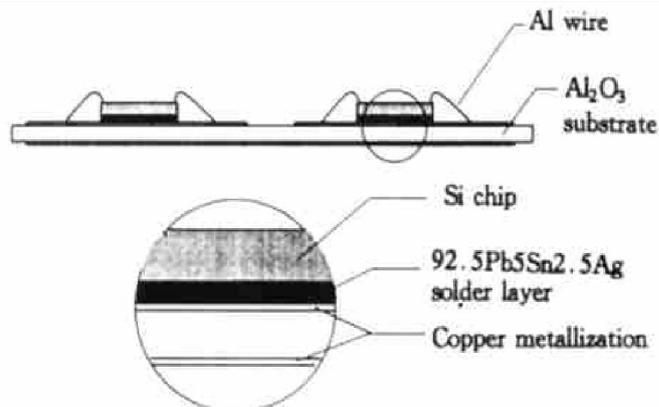


图 1 IGBT 功率模块的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IGBT power modules

① [收稿日期] 2000- 01- 23; [修订日期] 2000- 05- 21

[作者简介] 张胜红(1974- ), 男, 硕士研究生。

化合物(亮区)和初生富 Sn 相(暗区)。图 2(b) 所示裂纹由周边角部缺陷处(如空洞)开始, 初始裂纹沿一定角度扩展后, 在 PbSnAg 焊层内近似平行界面扩展。由于 PbSnAg 钎料与 Si 芯片的热膨胀失配大于焊料与 DCB 基板一侧材料(如 Cu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的热膨胀失配(见表 2), 裂纹靠近 Si 芯片/钎料界面扩展。目前, 对功率模块钎料焊层的热循环失效还没有统一的判据<sup>[3]</sup>, 焊层裂纹扩展的面积达 10%~30% 时, 可引起功率模块的热阻明显增加。

在实验过程中, 每间隔~200 次循环从实验箱中取出试样, 采用 C 模式扫描超声波显微镜(CSAM)对 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层的裂纹扩展进行检测。CSAM 使用高频超声(如 50MHz), 利用试样内部不同界面(或深度)的反射信号在行进时间上的不同, 通过截取时间域一定位置和宽度的反射超声

信号, 得到试样一定深度内的特征信息, 并转化为图像。

## 1.2 结果分析

### 1.2.1 超声图像

图 3 是 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层的典型超声图像。由图可见, 矩形灰度区域是 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层, 裂纹扩展由周边开始, 随热循环次数的增加, 裂纹扩展向中心发展, PbSnAg 焊层的开裂面积增加。图中同时列出了不同位置的超声反射波形, 阴影部分是截取超声反射信号的位置和宽度。未失效焊层所截取的超声反射信号呈正峰; 裂纹位置在四周边缘, 超声反射信号是明显的负峰。如前所述, 热循环条件下 PbSnAg 焊层失效的物理过程是裂纹的产生和扩展。由于焊层的缺陷(如微观空洞、表

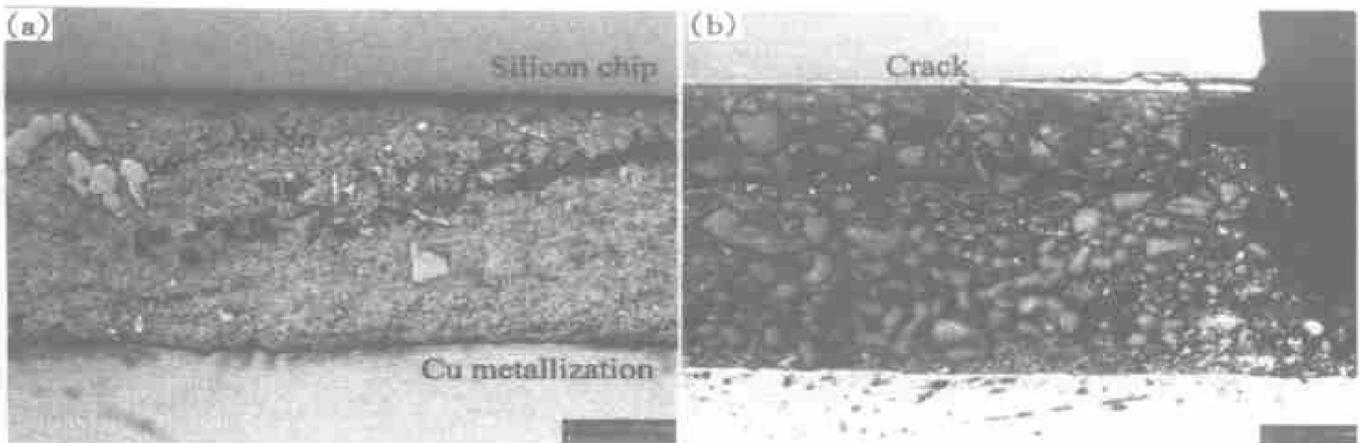


图 2 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层的微观组织(a)和裂纹位置(b)

Fig. 2 Microstructure of 92.5Pb5Sn2.5Ag solder layer (a) and location of crack (b)

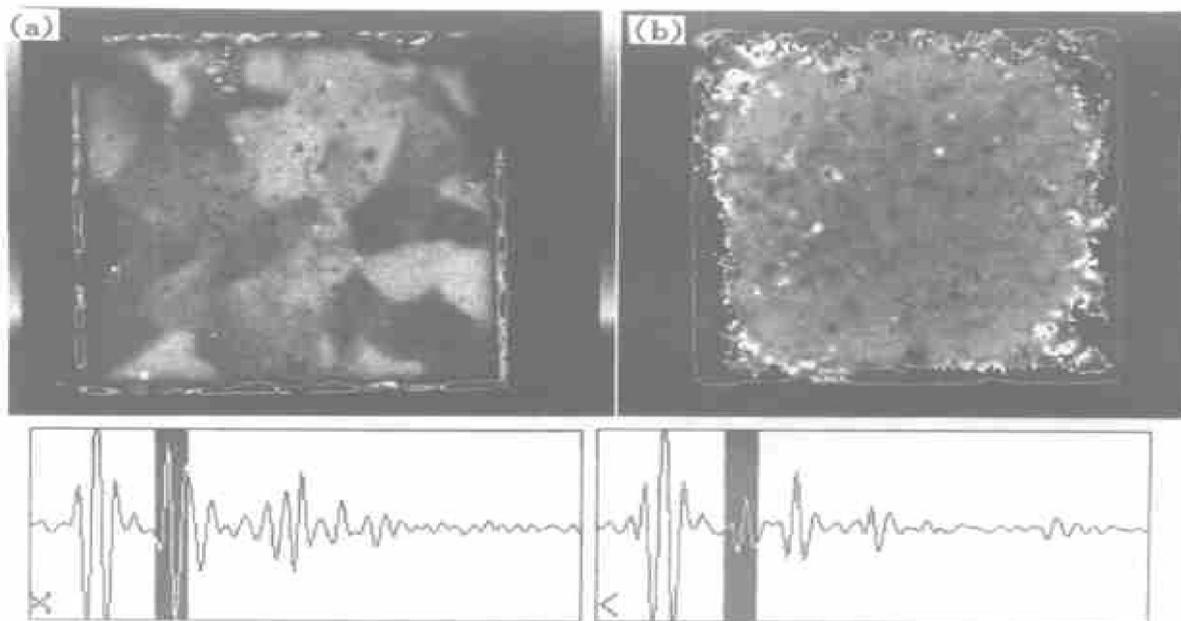


图 3 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层裂纹扩展的超声图像

Fig. 3 CSAM images of crack propagation of 92.5Pb5Sn2.5Ag solder layer

(a) —Before test; (b) —After 2 321 thermal cycles

面皱褶等) 可视为焊层的微裂纹, 为简化起见, 忽略 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层热循环条件下的裂纹萌生过程。

### 1.2.2 裂纹扩展数据

基于 SnPb 焊层裂纹扩展的 CSAM 图像, 采用图像分析软件, 可以确定 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层裂纹扩展面积的百分比。近似认为焊层裂纹扩展沿周边向中心具有相似的矩形, 由此导出沿对角线裂纹长度( $a$ ) 与裂纹失效面积百分比( $\zeta$ ) 的关系:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \cdot (1 - \sqrt{1 - \zeta}) \quad (1)$$

式中  $D_1, D_2$  是 PbSnAg 焊层的矩形边长。

利用上述关系求解裂纹长度, 图 4 所示是裂纹长度与热循环周数的关系。结果表明, 随着热循环过程的继续, 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层的裂纹长度增加, 在热循环 2000~4000 次范围内, 裂纹扩展速率约为 0.2  $\mu\text{m}/\text{cycle}$ 。

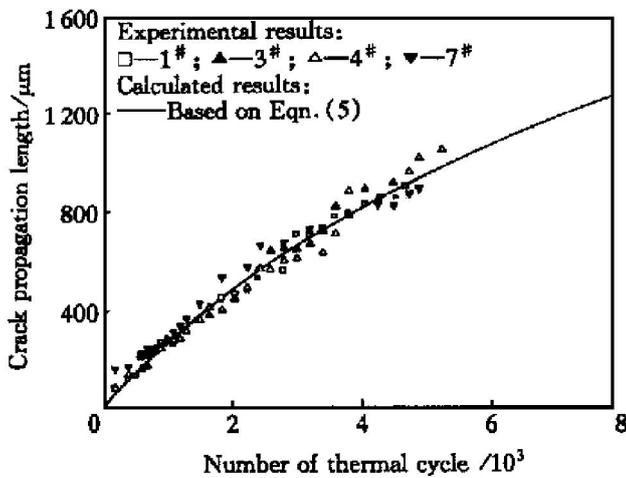


图 4 裂纹扩展长度与热循环周数的关系

Fig. 4 Relationship between number of thermal cycles and crack propagation length

## 2 模拟研究

### 2.1 PbSnAg 钎料的本构方程

由于 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料的熔点较低, 电子封装及组件的工作温度(如 -65  $^{\circ}\text{C}$  ~ +150  $^{\circ}\text{C}$ ) 可达合金熔点(K) 的 0.4~0.75, 此时, 钎料的变形与温度和时间(或速率) 有关, 表现为粘塑性。本文采用具有单一内部变量的统一型粘塑性 Anand 方程<sup>[9]</sup> 描述 PbSnAg 钎料的力学本构。

Anand 本构的流动方程采用双曲蠕变规律, 可描述为

$$\dot{\epsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right)\right]^{1/m} \quad (2)$$

式中  $\dot{\epsilon}_p$  是非弹性应变速率,  $A$  是常数,  $Q$  是激活能,  $m$  是应变率敏感指数,  $\xi$  是应力乘子,  $R$  是气体常数,  $T$  是温度。内部变量形变阻抗  $s$  体现了材料各向同性强化时对宏观塑性流动的平均阻抗, 与位错密度、固溶体强化以及晶粒尺寸效应等相关, 内部变量  $s$  的演化方程为

$$\dot{s} = \left[ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^{\lambda} \cdot \text{sgn}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right] \cdot \dot{\epsilon}_p; \quad \lambda > 1 \quad (3)$$

式中

$$s^* = \hat{s} \left[ \frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n \quad (4)$$

式中  $h_0$  是硬化/软化常数,  $\lambda$  是与硬化/软化相关的应变率敏感指数, 符号  $s^*$  表示给定温度和应变率时内部变量的饱和值,  $\hat{s}$  是系数,  $n$  是指数,  $\text{sgn}$  是符号函数。

通过力学性能实验得到了 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料在恒应力蠕变和恒应变速率实验条件下的应力应变数据, 基于稳态塑性流动和饱和应力概念, 确定了粘塑性 Anand 本构的材料参数, 结果如表 1 所示<sup>[10, 11]</sup>, 其中  $s_0$  为初始形变阻抗。

表 1 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料的粘塑性 Anand 本构方程的材料参数

Table 1 Material coefficients of viscoplastic Anand constitutive equation for 92.5Pb5Sn2.5Ag solder

$A$	$Q/R$	$\xi$	$m$	$\hat{s}$	$n$	$h_0$	$\lambda$	$s_0$
$1.03 \times 10^7$	11 010	7	0.241	33.07	0.002	1 432	1.30	23.07

### 2.2 有限元模拟

#### 2.2.1 $\Delta J$ 积分

如前所述, 基于断裂力学方法描述裂纹扩展速率, 对热循环寿命进行估计是 SnPb 基钎料焊点可靠性研究的一种重要方法。通常采用幂指数函数形式描述热循环条件下力学参量的变化范围  $\Delta H$  与裂纹扩展速率  $da/dN$  的关系<sup>[12, 13]</sup>, 即

$$da/dN = \alpha (\Delta H)^{\beta} \quad (5)$$

式中  $\alpha, \beta$  是常数, 与材料和加载条件有关。

本文通过模拟裂纹体在热循环条件下的应力应变, 求解力学参量  $\Delta J$  积分( $\Delta J = J_{\max} - J_{\min}$ ,  $J_{\max}$  和  $J_{\min}$  分别是一次热循环内  $J$  积分的最大值和最小值)。  $J$  积分定义为

$$J = \int_{\Gamma} (W n_x - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x}) ds \quad (6)$$

式中  $W = \int \sigma d\epsilon$  是应变能密度,  $T_i$  是张量,  $u_i$

( $i = x, y$ ) 是位移,  $\Gamma$  是积分路径,  $n_x$  是路径  $\Gamma$  的法向单位矢量在  $x$  方向上的分量。

### 2.2.2 几何构型及材料参数

对单个芯片及其 PbSnAg 焊层进行二维(2D)有限元模拟, 考虑结构的对称性, 取 1/2 结构进行模拟。本研究对多种裂纹长度的裂纹体进行了模拟, 图 5 是裂纹长度为 0.8mm 时的有限元网格。考虑裂纹尖端应力应变场的奇异性, 裂纹尖端的单元采用奇异单元, 充分细化, 并考虑接触情况。有限元分析的热循环加载条件与实验相一致, 并选取参考温度为 398 K, 模拟进行到热循环的第 4 个周期。此时, 应力应变随热循环过程的继续已趋于稳定。通过在裂纹尖端定义积分路径, 求解  $J$  积分。

92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料的粘塑性材料参数如表 1 所示, 热膨胀系数(CTE)和弹性模量( $E$ )如表 2 所示。 $Al_2O_3$  陶瓷、FR4 树脂基板和金属 Cu 层的材料模式为线弹性材料, 弹性力学性能如表 2 所示。

### 2.2.3 结果分析

$J$  积分的计算结果表明,  $J$  积分的变化与热循环的温度曲线相对应, 在一个热循环周期内,  $J_{max}$  产生在低温阶段(-55 °C),  $J_{min}$  产生在高温阶段(+125 °C), 并且  $J_{min}$  是接近零的较小值。Dowling<sup>[14]</sup>认为在热循环加载条件下, 当卸载阶段  $J$  积分值较小时,  $\Delta J$  可以作为裂纹扩展的力学参量。Ju<sup>[6]</sup>针对热循环条件下共晶 60Sn40Pb 钎料焊点的裂纹扩展, 讨论了  $\Delta J$  的适用性, 也认为在热循环的高温阶段  $J$  积分值相对较小时, 可以用  $\Delta J$  描述 SnPb 基钎料焊点热循环裂纹扩展速率。表 3 列出了 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层热循环裂纹长度  $a$  及相应  $\Delta J$  的计算结果。可以看出, 随着裂纹长度的增加,  $\Delta J$  减小, 并将导致裂纹扩展速率的下降。

基于裂纹扩展的实验数据和计算的  $\Delta J$ , 可以确定式(5)的参数:  $\alpha = 0.0027$ ,  $\beta = 1.8$ 。图 4 列出了裂纹扩展的实验数据和基于式(5)的计算结果的比较。结果表明, 采用  $\Delta J$  作为裂纹扩展的力学参

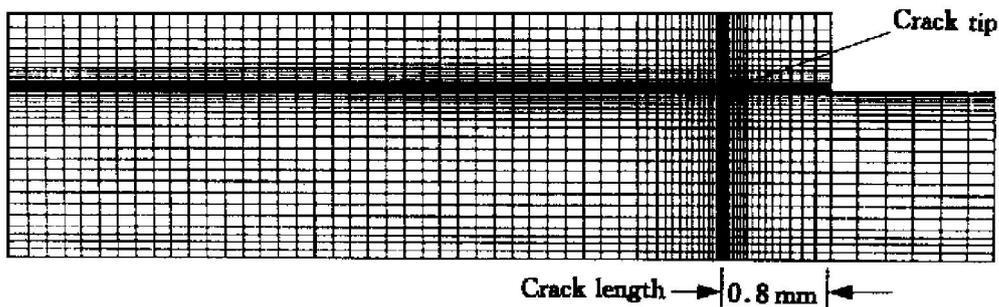


图 5 2D 裂纹体的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of 2D cracked structure

表 2 材料的弹性力学性能

Material	CTE/ $10^{-6} K^{-1}$	$E/MPa$	Poisson ratio
92.5Pb5Sn2.5Ag	29.0	$2.47 \times 10^4 - 37.3 T(°C)$	0.35
Cu	17.0	$1.17 \times 10^5$	0.30
Silicon	2.5	$1.48 \times 10^5$	0.25
$Al_2O_3$	7.8	$3.30 \times 10^5$	0.25

表 3 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层裂纹长度与计算的  $\Delta J$  积分

Crack length, $a/mm$	$\Delta J$ integral/ $(N \cdot mm^{-1})$
0.3	0.2539
0.6	0.2164
0.8	0.1985
1.0	0.1810
1.2	0.1631
1.6	0.1389
2.4	0.1083
3.4	0.0890

量, 可以描述 PbSnAg 焊层热循环裂纹扩展过程, 并与实验结果相一致。

需要指出, 由于 92.5Pb5Sn2.5Ag 是一种粘塑性材料, 在热循环条件下将产生蠕变变形, 基于时间相关断裂力学理论, 可采用  $C^*$  积分作为裂纹扩展的力学参量<sup>[15]</sup>, 但是  $C^*$  的数值计算困难。另外, 由于焊层的断裂方式是复合模式, 应力强度因子  $\Delta K$  也不适用。采用其他力学参量(如能量释放率  $G$ )描述 SnPb 基钎料焊层热循环裂纹扩展, 还有待进一步研究。

## 3 结论

本文采用热循环实验, 研究了 IGBT 功率模块 92.5Pb5Sn2.5Ag 钎料焊层的裂纹扩展。结果表明, 热循环裂纹扩展由周边向中心发展, 裂纹扩展速率随裂纹长度的增加而减小。应用超声波显微镜, 可

以实现 SnPbAg 焊层热循环裂纹扩展的检测, 对焊层失效进行评价。采用统一型粘塑性 Anand 方程, 描述了 92.5Pb5Sn2.5Ag 合金的力学本构, 模拟了功率模块裂纹体在热循环条件下的应力应变。可以利用力学参量积分描述热循环条件下 92.5Pb5Sn2.5Ag 焊层裂纹扩展速率, 模拟结果与实验结果相吻合。

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Lau J H and Pao Y H. Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip and Fine Pitch SMT Assemblies [ M ]. New York: McGraw-Hill Press, 1996. 9- 14.
- [ 2 ] WANG Guo-zhong, ZHU Qi-nong, CHENG Zhao-nian, et al. Solder joint geometry of tin-lead alloy and its application in electronic packaging [ J ]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(4): 733- 740.
- [ 3 ] Herr E, Frey T, Schlegel R, et al. Substrate-to-base solder joint reliability in high power IGBT modules [ J ]. Microelectron Reliab, 1997, 37(10/11): 1719- 1722.
- [ 4 ] Wilde J, Staiger W and Thoben M. An integration design approach for the hardware optimization of electrical power modules for automotive electrotraction [ A ]. Proc IEEE Vehicle Electronics Conf [ C ]. Changchun, China, 1999. 170- 178.
- [ 5 ] Fusaro J M and Darveaux R. Reliability of copper-based plate high current power modules [ J ]. Intern J Microcircuits and Elect Packag, Second Quarter, 1997, 20(2): 81- 88.
- [ 6 ] Ju S H, Sandor B I and Plesha M E. Life prediction of solder joints by damage and fracture mechanics [ J ]. ASME J Elect Packg, 1996, 118(3): 193- 200.
- [ 7 ] Logsdon W A, Liaw P K and Burke M A. Fracture behavior of 63Sn37Pb solder [ J ]. J Engineering Fracture Mechanics, 1990, 36(2): 183- 218.
- [ 8 ] Lin D R and Pao Y H. Fatigue-creep crack propagation path in solder joints under thermal cycling [ J ]. J Electronic Materials, 1997, 26(9): 1058- 1064.
- [ 9 ] Anand L. Constitutive equations for hot working of metals [ J ]. Inter J Plasticity, 1985, 1: 213- 231.
- [ 10 ] Wilde J, CHENG Zhao-nian and WANG Guo-zhong. Influences of packaging materials on the solder joint reliability of chip scale package assemblies [ A ]. Proc Intern Advanced Packaging and Materials Symp [ C ]. Braselton Georgia, 1999. 144- 149.
- [ 11 ] WANG Guo-zhong, CHENG Zhao-nian, Wilde J, et al. Applying Anand model to represent the viscoplastic deformation behavior of solder alloys [ J ]. ASME J Elect Packag, (accepted).
- [ 12 ] Hu J M. An empirical crack propagation model and its application for solder joints [ J ]. ASME J Elect Packag, 1996, 118(2): 104- 107.
- [ 13 ] Darveaux R and Banerji K. Fatigue analysis of flip chip assemblies using thermal stress simulation and a Coffin-manson relation [ A ]. Proc IEEE 41th Elect Comp Tech Conf [ C ], 1991. 797- 805.
- [ 14 ] Dowling N E and Begley J A. Fatigue crack growth during gross plasticity and the  $J$ -integral, mechanics of crack growth [ J ]. ASTM STP 590, 1976: 82- 103.
- [ 15 ] Riedel H. Creep deformation at crack tips in elastic-viscoplastic solids [ J ]. J Mech Phys Solids, 1981, 29: 35 - 49.

## Reliability of PbSnAg solder layer of power modules under thermal cycling in electronic packaging

ZHANG Sheng-hong, WANG Guo-zhong, CHENG Zhao-nian

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Science,  
Shanghai 200050, P. R. China)

**[ Abstract ]** By applying thermal cycling tests to the IGBT power modules, the thermal fatigue and crack propagation of 92.5Pb5Sn2.5Ag solder layer were investigated. The crack propagation process in solder layer was inspected with C-mode scanning acoustic microscope (CSAM) and the crack propagation data were also measured. By employing the unified viscoplastic Anand constitutive equation to represent the deformation behavior of 92.5Pb5Sn2.5Ag solder, the stress/strain responses of the power modules with crack in PbSnAg solder layer under thermal cycling were simulated with finite element method. Moreover, the crack propagation rate of PbSnAg solder layer under thermal cycling was described based on the calculation of mechanical parameter  $\Delta J$  integral.

**[ Key words ]** 92.5Pb5Sn2.5Ag solder; thermal cycling; crack propagation; viscoplastic;  $\Delta J$  integral

(编辑 袁赛前)