

2193-98
金属学报

复合 SnPb 焊点的形态与可靠性预测 *

朱奇农 王国忠 程兆年 罗乐

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

摘要 建立了复合焊点形态的能量控制方程, 采用 Surface Evolver 软件模拟了复合 SnPb 焊点 (高 Pb 焊料凸点, 共晶 SnPb 焊料圆角) 的形态。利用复合 SnPb 焊点形态的计算结果, 采用统一型粘塑性 Anand 本构方程描述复合焊点 Pb90Sn10 和 Sn60Pb40 的粘塑性力学行为, 采用非线性有限元方法分析复合 SnPb 焊点在热循环条件下的应力应变过程, 基于 Coffin-Manson 经验方程预测焊点的热循环寿命, 考察焊点形态对焊点可靠性的影响, 研究了复合 SnPb 焊点间隙和焊点的热循环寿命之间的关系。

关键词 电子封装, 焊点, 有限元模拟, 形态预测, 热循环寿命, 可靠性

中图分类号 TG40, O241.82

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)01-0093-06

TN305
TG40

PREDICTION OF GEOMETRY AND RELIABILITY OF DUPLEX SnPb SOLDER JOINT

ZHU Qinong, WANG Guozhong, CHENG Zhaonian, LUO Le

Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050

Correspondent: ZHU Qinong, Tel: (021)62511070-8512, Fax: (021)62131233

Manuscript received 1999-06-10, in revised form 1999-10-11

ABSTRACT The potential energy controlling equation for SnPb solder joint geometry was investigated, and the solder joint geometry with duplicate SnPb solders in flip chip technology was simulated by Surface Evolver. Based on the unified viscoplastic Anand constitutive equation, the viscoplastic deformation behavior of SnPb solder was described. The stress and strain distributions in duplex SnPb solder joint during thermal cycle were studied by finite element method, the thermal cycle life of duplex SnPb solder joint was predicted based on Coffin-Manson equation. The solder joint geometry with duplicate SnPb solders was linked with the solder joint reliability. There exists a direct relationship between stand-off height and thermal cycle life of solder joint with duplicate SnPb solders and a regression model was carried out.

KEY WORDS electronic packaging, solder joint, finite element simulation, geometry prediction, thermal cycle life, reliability

在高密度电子封装技术中, 为了提高封装密度, 改善器件性能, 以倒装焊工艺为基础的芯片在基板上的直接互连技术 (如 COB, DCA 等) 受到广泛的关注^[1]。在这类互连技术中, 经常采用复合 SnPb 焊料焊点的结构, 即在芯片上用高熔点焊料做成焊料凸点, 然后利用低熔点焊料 (如 Sn60Pb40) 的再流焊工艺形成复合 SnPb 焊点, 实现芯片和基板的连接。电子器件在封装及服役条件下, 由于功率耗散和环境温度的变化, 因材料的热膨胀失配在 SnPb 焊点内产生交变的应力和应变, 导致焊点的热疲劳失效。焊点的热疲劳失效 (可靠性) 是电子封装领域的关键问题之一。研究表明^[2-5], 焊点的可靠性一方面取决于焊点材料的力学性能, 另一方面和焊点的几何形状密切相关。近年来, 基于 SnPb 焊点形态

及焊点可靠性的研究受到了人们的重视。Subbarayan^[2], Ju^[3] 和 Heinrich^[4] 等利用解析方法对球阵栅列 (BGA) 中 SnPb 焊点的形态进行了模拟, 探讨了焊点形态与可靠性的关系。本文作者对表面贴装 SnPb 焊点的形态和可靠性之间的关系也进行了研究^[5], 提出了焊点的热循环寿命和焊点形态参数——焊点间隙之间关系的经验方程。目前对复合 SnPb 焊点形态及其对可靠性的影响的研究尚不多见。

本文通过建立复合 SnPb 焊点形态的能量控制方程, 利用有限元方法对倒装焊中复合 SnPb 焊点形态进行模拟, 分析了复合 SnPb 焊点在热循环过程中的应力应变过程, 考察了焊点形态对焊点的热循环寿命的影响。

1 焊点形态的模拟

1.1 数学模型

复合 SnPb 焊料焊点的结构见图 1。为了使问题简化, 并且在合理的精度内, 有效模拟复合 SnPb 焊点的形态, 假

* 收到初稿日期: 1999-06-10, 收到修改稿日期: 1999-10-11

作者简介: 朱奇农, 男, 1969 年生, 博士生

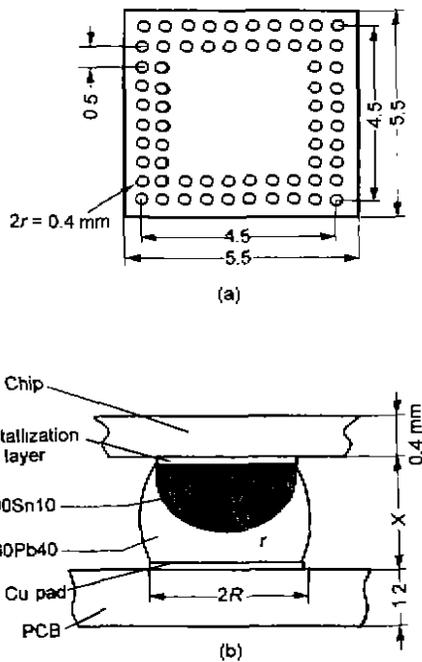


图1 倒装焊复合 SnPb 焊点结构示意图

Fig.1 Schematic structure of flip-chip solder joint with duplicate SnPb solders (X —stand-off height, R —radius of Cu pad, r —radius of solder bump)
(a) chip (b) single solder joint

设：(1) 焊点形态为再流焊时熔融 SnPb 焊料沿焊点处可润湿金属表面润湿铺展所达到的准静平衡形状，并忽略冷凝过程对焊点形态的影响；(2) 焊料凸点呈理想的半球型，在再流焊时，焊料凸点不熔化，忽略高 Pb 焊料与低熔点 SnPb 焊料之间溶解、扩散等。

根据以上假设，基于能量最小原理，可认为焊点形态是熔融焊料以及与焊料接触的固相、气相所组成的系统处于势能最小时的准静平衡状态。控制复合 SnPb 焊点形态的焊点体系的势能 (E) 为界面势能 (E_S) 和重力势能 (E_G) 之和，即

$$E = E_S + E_G \quad (1)$$

式中， $E_S = \int \int_A \gamma' dA$; $E_G = \int \int \int_V \rho g z \cdot dV$ 。其中， γ' 为界面张力； ρ 为共晶 SnPb 焊料密度； z 为高度坐标； g 为重力加速度； A 和 V 分别为面积和体积。基于 Laplace-Young 方程，对焊点体系的总势能求最小值，可得复合 SnPb 焊点能量控制方程为

$$\min E = \min \left[\int \int_{A_0} \gamma \cdot dA + \int \int_{A_1} -\gamma \cos \theta_1 \cdot dA + \int \int_{A_2} -\gamma \cos \theta_2 \cdot dA + \int \int \int_V \rho g z \cdot dV \right] \quad (2)$$

式中， γ 为熔融共晶 SnPb 焊料的表面张力； A_0 、 A_1 和 A_2 分别是熔融 SnPb 焊料与空气、基板焊盘 (如 Cu, Ni 金属化层) 及高 Pb 焊料凸点的界面面积； θ_1 和 θ_2 相应为熔融 SnPb 焊料在基板焊盘和焊料凸点的润湿角。基于 SnPb 焊点形态的能量控制方程、焊点形态的边界条件和约束条件，采用 Surface Evolver 软件 [6] 可以对复合 SnPb 焊点形态进行模拟。

1.2 焊点形态模拟结果与分析

复合焊点形态的模拟结果如图 2, 3 所示。图中，半球是芯片的高 Pb 焊料凸点，为了直观起见，共晶 SnPb 焊料的左半部分被通过焊盘直径的垂直平面切开。从图 2 可见，随着低熔点焊料体积的增加，焊点的形状由凹形变为凸形，同时焊点间隙 X 随低熔点焊料体积 V 的增加而增大。图 3 是不同的焊料凸点和焊盘尺寸匹配 (R/r , R 为焊盘半径, r 为焊料凸点半径) 时的焊点形态。由图可见，焊点间隙 X 随着 R/r 比值的增大而减小。

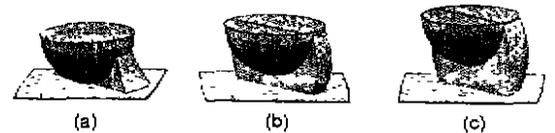


图2 低熔点焊料体积对焊点形态的影响

Fig.2 Effect of solder volume on solder joint geometry ($R=0.2$ mm, $r=0.2$ mm)
(a) $V=0.01$ mm³ (b) $V=0.02$ mm³ (c) $V=0.03$ mm³

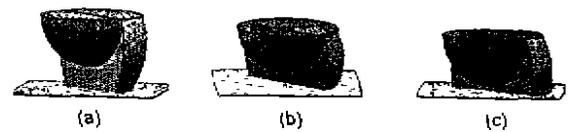


图3 焊料凸点和焊盘尺寸匹配 (R/r) 对焊点形态的影响

Fig.3 Effects of the size of solder bump and pad on solder joint geometry
(a) $R/r=0.8$ (b) $R/r=1.0$ (c) $R/r=1.2$

图 4 是复合 SnPb 焊点间隙和共晶焊料体积、焊料凸点与焊盘尺寸匹配的关系。研究表明，低熔点 SnPb 焊料体积存在临界值 (V_c)，当低熔点 SnPb 焊料体积 $V \leq V_c$ 时，低熔点 SnPb 焊料的表面张力、浮力作用不足以支撑芯片焊料凸点，焊点间隙等于芯片上焊料凸点的半径，即芯片焊料凸点和基板直接接触；当低熔点 SnPb 焊料体积 $V > V_c$ 时，焊点间隙大于芯片上焊料凸点的半径，并随低熔点 SnPb 焊料体积增大而近似呈线性增大。由于在倒装焊技术中，芯片的重量一般完全由焊点来支撑，因此芯片的重量和单位芯片上的焊料凸点数的变化将影响再流焊后的焊点形态。

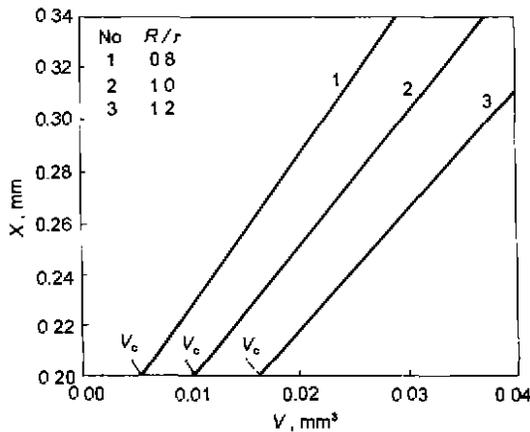


图 4 焊点间隙 (X) 和低熔点焊料体积 (V)、焊盘与焊料凸点尺寸配比 (R/r) 的关系
Fig.4 Relationship between V, R/r and X

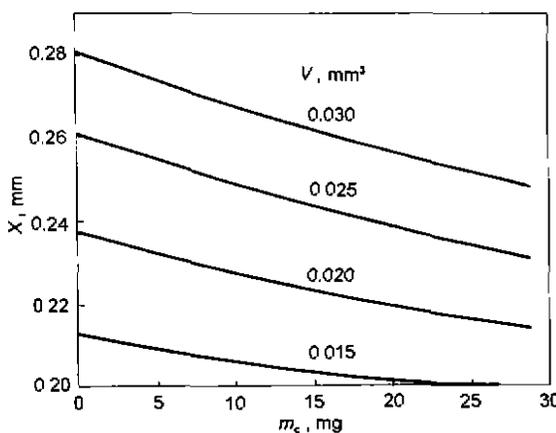


图 5 单个凸点承担的芯片重量对焊点间隙的影响

Fig.5 Effect of average chip weight (m_c) of single solder bump on stand-off height of solder joint ($R/r=1.0$, $r=0.2$ mm)

图 5 是单个焊料凸点所承担的芯片重量对焊点间隙的影响。随着单个焊料凸点所承担的芯片重量的增加, 再流焊后焊点间隙减小, 同时增加低熔点焊料体积, 焊点间隙增大。

综合考虑共晶 SnPb 焊料体积 (V)、芯片焊料凸点的尺寸 (r_b)、焊盘的尺寸 (R_p)、芯片重量 (m_c)、芯片上焊料凸点的个数 (n_b) 对焊点间隙的影响, 对焊点间隙的模拟结果进行回归分析, 可得到焊点间隙的回归模型 [7]

$$X = f(V, r_b, R_p, m_c, n_b) \quad (3)$$

在已知焊点的设计及工艺参数 (如芯片重量、凸点个数、基板焊盘尺寸、芯片凸点尺寸以及焊点再流焊时的焊料体积) 条件下, 利用式 (3) 可计算出焊点间隙。

2 焊点热循环寿命的模拟

2.1 有限元模型及材料模式

有限元分析方法是评价电子封装中 SnPb 热循环焊点可靠性的有效手段。本文采用的复合 SnPb 焊点芯片直接

互连的几何结构如图 1 所示, 为边置双列焊点阵列封装。由于结构中心最远的焊点在热循环过程中所受到的应力应变最大, 同时考虑到结构具有对称性, 沿对角线方向取实际结构的 1/2 进行了平面应变条件下的有限元分析, 具有典型复合 SnPb 焊点形态的有限元模型如图 6 所示。为较精确地模拟焊点在热循环过程中的应力应变响应, 复合 SnPb 焊点采用较细的有限元单元 (如图 6b), 对其它部分采用较粗的单元, 为了实现粗细有限元单元间的过渡, 采用了约束方程。有限元分析的热循环加载条件为 $-55-125$ °C, 升-降温速率为 18 °C/min, 高-低温时各保温 20 min, 热循环频率为 1 cyc/h。

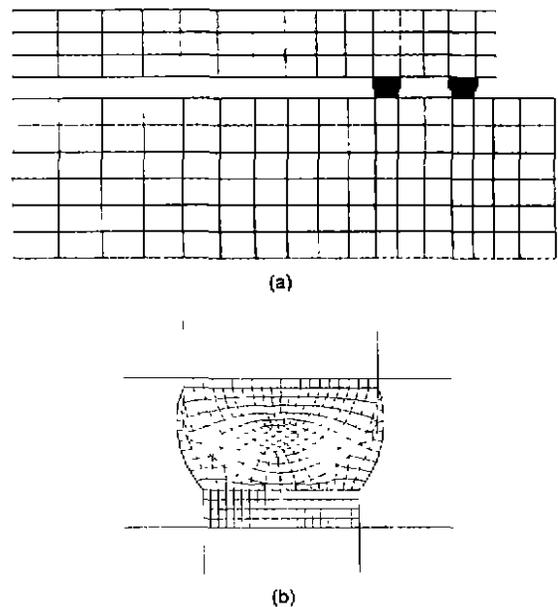


图 6 典型焊点形态的有限元模型
Fig.6 Finite element model of typical solder joint geometry
(a) the whole model (b) single solder joint

由于 SnPb 的熔点较低, 在典型的热循环温度条件下, SnPb 焊料的变形行为表现为与时间 (或速率) 相关、非弹性变形具有粘塑性性质。研究采用统一型粘塑性 Anand 方程描述 SnPb 焊料的力学本构关系 [8], 粘塑性 Anand 本构有两个基本特征: (1) 在应力空间没有明确的屈服面, 故在变形过程中不需要加载 / 卸载准则; (2) 用单一内变量形变内阻 (s) 描述材料内部状态对塑性流动的宏观阻抗。粘塑性 Anand 本构的流动方程可描述为

$$\dot{\epsilon}_p = A' \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right)\right]^{1/m} \quad (4)$$

式中, $\dot{\epsilon}_p$ 为非弹性应变速率, A' 为常数, Q 为激活能, m 为应变敏感指数, ξ 为应力乘子, R 为气体常数, T 为温度, 内变量演化方程可表达为

$$\dot{s} = \left[h_0 \left|1 - \frac{s}{s^*}\right|^n \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right)\right] \cdot \dot{\epsilon}_p \quad (5)$$

表 1 SnPb 焊料的粘塑性 Anand 方程的材料参数^[8]
Table 1 Material parameters of viscoplastic Anand equation^[8] for SnPb solder

| Solder | $A', 10^7$ | $Q/R, 10^2$ | ξ | m | \hat{s} | $n, 10^{-2}$ | $h_0, 10^2$ | a | s_0 |
|----------|------------|-------------|-------|-------|-----------|--------------|-------------|------|-------|
| Pb90Sn10 | 3.25 | 155.83 | 7 | 0.143 | 72.73 | 0.438 | 17.87 | 3.73 | 15.09 |
| Sn60Pb40 | 1.49 | 108.30 | 11 | 0.303 | 80.415 | 2.310 | 26.40 | 1.34 | 56.33 |

式中

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

式中, h_0 为形变硬化 - 软化常数, a 为与硬化 - 软化相关的应变敏感指数, s^* 为变量饱和值, \hat{s} 为系数, n 为指数. 粘塑性 Anand 本构方程中, 共有 9 个材料参数: $A', Q, \xi, m, n, h_0, \hat{s}, a$ 以及初始形变阻抗 s_0 . 表 1 列出了复合焊点中 Pb90Sn10 和 Sn60Pb40 焊料的 Anand 方程的材料参数, 表 2 给出了两种焊料的热膨胀系数 α 和弹性模量 E . 其它材料为线弹性各向同性材料, 相关的材料参数亦见表 2.

表 2 结构材料的弹性力学性能^[9]

Table 2 Elastic mechanical properties of structure materials^[9]

| Material | Coefficient of thermal expansion $\alpha, 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | Young's modulus $E, 10^4 \text{ MPa} (T \text{ in } ^\circ\text{C})$ |
|----------|---|--|
| Pb90Sn10 | 27.8 | $2.40-26.7T \times 10^{-4}$ |
| Sn60Pb40 | 25.0 | $3.32-173.0T \times 10^{-4}$ |
| Copper | 17.0 | 12 |
| FR-4 | 16.0 | 1.6 |
| Si | 3.2 | 37.28 |

2.2 焊点在热循环过程中的应力应变响应

由于外侧焊点离结构中心位置最远, 在热循环过程中,

外侧焊点经受的应力应变范围更大. 因此, 在焊点循环过程中应力应变分析时取外侧焊点. 由于 Sn60Pb40 和 Pb90Sn10 两种焊料力学性能的差异, 故在热循环过程中应力应变的响应不同. 研究表明, 复合 SnPb 焊点热循环失效主要发生在低熔点 SnPb 的焊料中^[10]. 因此, 研究以分析 Sn60Pb40 的应力应变响应为主.

对热循环过程中不同阶段焊点中的应力分布分析表明, 在热循环过程降温结束时, 由于从高温到低温降温过程的 CTE 失配以及低温时材料相对较高的弹性模量, 复合 SnPb 焊点中应力水平较高. 图 7a 是热循环降温过程结束时的应力应变分布, 从图中可以看出高应力区域的应力值达到 55 MPa 以上, 复合 SnPb 焊点中 Sn60Pb40 焊料与基板焊盘 Cu 层界面外缘角部附近是焊点的高应力区域, 这也是热循环过程中裂纹产生的可能位置.

为了对焊点热循环可靠性进行评价, 需要得到热循环过程中焊点最薄弱位置, 并基于该处的应力应变数据, 确定 SnPb 焊点的热循环寿命. 由于形变阻抗的分布特征依赖于历史, 并在热循环过程中累积, 体现焊点内粘塑性形变的累积特征, 能反映热循环过程中焊点的最薄弱位置. 图 7b 是焊点在热循环过程中形变阻抗的分布. 从图可以看出, 复合焊点中 Sn60Pb40 焊料与基板焊盘 Cu 层界面外缘角部附近是形变阻抗的集中位置.

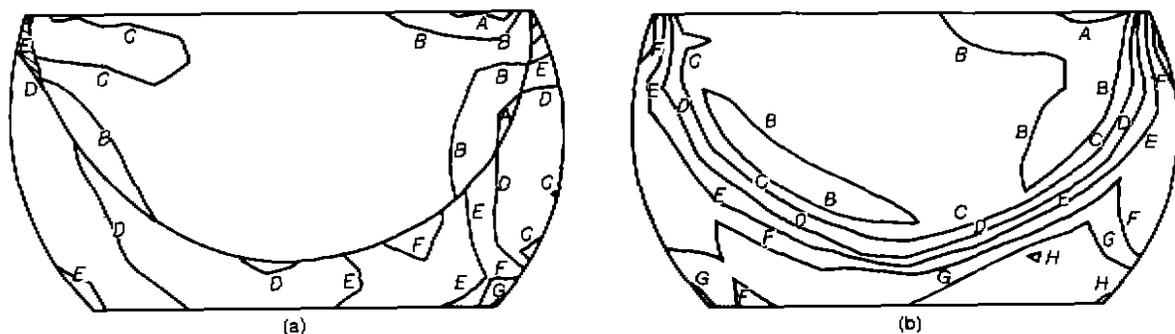


图 7 复合 SnPb 焊料焊点的等效应力和形变阻抗分布

Fig.7 Distribution of equivalent stresses (σ_e^c) and inelastic strain of duplicate solder joint ($R/r=0.8$)

(a) stress (σ_e^c , MPa) distribution (b) deformation resistance distribution (at the end of 3 cyc)

| Fig No. | A | B | C | D | E | F | G | H |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 7a | 24.978 | 30.659 | 36.340 | 42.020 | 47.701 | 53.382 | 59.063 | - |
| 7b | 38.522 | 45.586 | 52.651 | 59.716 | 66.780 | 73.845 | 80.910 | 87.974 |

2.3 热循环寿命预测

对 12 种形态的复合 SnPb 焊点的可靠性进行了有限元模拟 (如表 3), 对不同焊点间隙和 R/r 分别为 0.8、1.0、1.2 时的复合焊点在热循环过程中的应力应变分布结果表明, 高应力区和高应变区无明显变化, 因而可以采用同一模式来对其热循环寿命进行预测。本文基于低周疲劳寿命模式的 Coffin-Manson 经验方程, 通过确定复合 SnPb 焊点中薄弱位置的非弹性剪切应变范围 ($\Delta\gamma_{xy}^{in}$), 对倒装焊中复合 SnPb 焊料焊点的热循环寿命 (N_f) 进行预测。图 8 为复合焊点中 Sn60Pb40 焊料与基板焊盘 Cu 层界面外缘角部附近在热循环过程中的剪切应力和非弹性剪切应变的关系, 由 Coffin-Manson 经验方程可描述为

$$N_f = \theta(\Delta\gamma_{xy}^{in})^\eta \quad (6)$$

式中, θ 和 η 为与材料和加载条件相关的常数。对低熔点

表 3 复合 SnPb 焊料焊点形态序列

Table 3 Series of duplicate SnPb solder joint geometry

| Solder joint state No. | R/r ($r=0.2$ mm) | V 10^{-2} mm ³ | X mm | N_f cyc |
|------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------|--------------|
| 1 | 0.8 | 0.125 | 0.212 | 203 |
| 2 | | 0.188 | 0.239 | 420 |
| 3 | | 0.250 | 0.263 | 812 |
| 4 | | 0.313 | 0.286 | 1415 |
| 5 | 1.0 | 0.188 | 0.213 | 265 |
| 6 | | 0.25 | 0.237 | 450 |
| 7 | | 0.313 | 0.260 | 816 |
| 8 | | 0.375 | 0.281 | 1315 |
| 9 | 1.2 | 0.250 | 0.209 | 216 |
| 10 | | 0.313 | 0.231 | 365 |
| 11 | | 0.375 | 0.251 | 658 |
| 12 | | 0.438 | 0.271 | 889 |

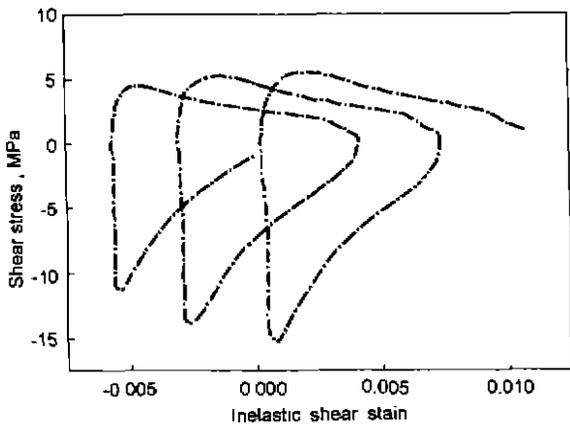


图 8 在热循环过程中的剪切应力和非弹性剪切应变的关系

Fig.8 The shear stress τ_{xy} vs inelastic shear strain γ_{xy}^{in} during thermal cycling

焊料 Sn60Pb40 和典型热循环加载条件, 材料常数 $\theta=1.35$, $\eta=-0.85$ [11]。

图 9 是不同配比 (R/r) 时, 焊点 Sn60Pb40 焊料体积 V 对复合 SnPb 焊料焊点热循环寿命 N_f 的影响。从图可以看出, 焊点的热循环寿命随焊点焊料体积的增加而增加。在相同的焊点焊料体积时, 焊点的热循环寿命随基板焊盘尺寸的减小 (即比值 R/r 减小) 而增加。因此, 在采用较小尺寸的基板焊盘时, 增加焊点的焊料体积, 能有效地提高复合 SnPb 焊点的热循环寿命。

由于焊盘尺寸和芯片凸点尺寸的配比 (R/r) 与焊点焊料体积的变化影响了焊点的间隙, 从而间接地影响了焊点的寿命。为了进一步分析 (R/r) 以及焊点焊料体积对焊点热循环寿命的影响, 考察了相应条件下所得到的焊点间隙与焊点热循环寿命的关系, 结果如图 10 所示。从图可见, 焊点间隙 X 和焊点的热循环寿命 N_f 之间有直接的依赖关系, X 增大, N_f 值提高。采用多项式回归可导出复合 SnPb 焊料焊点的间隙和焊点热循环寿命的解析关系, 即

$$N_f = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 \quad (7)$$

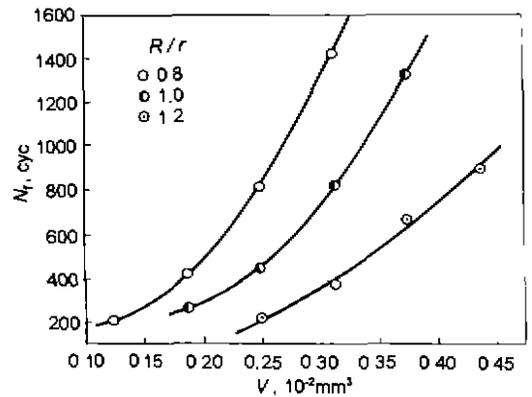


图 9 焊点焊料体积对焊点热循环寿命的影响

Fig.9 Effects of solder volume V on thermal cycle lives N_f

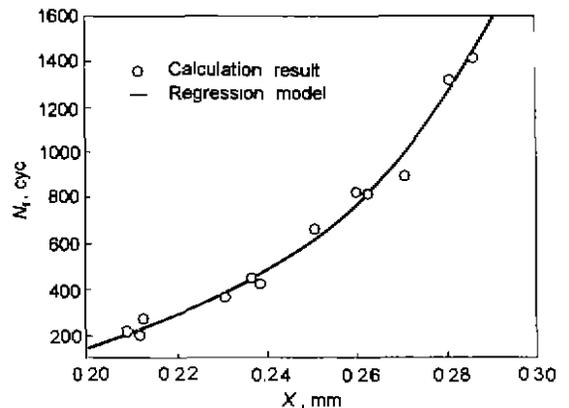


图 10 焊点间隙对焊点热循环寿命的影响

Fig.10 Effects of stand-off height X on thermal cycle lives N_f

所得到的回归模型参数约为: $a_0 = -1.6530 \times 10^4$, $a_1 = 2.2265 \times 10^5$, $a_2 = -1.0163 \times 10^6$, $a_3 = 1.5987 \times 10^6$.

如果结合焊点间隙的回归模型(式(3)),可以把焊点形态预测和焊点可靠性分析相结合,实现复合 SnPb 焊点几何结构的优化设计.

3 结论

(1) 复合 SnPb 焊料双列焊点中 Sn60Pb40 焊料与金属化 Cu 层界面的角部位置,是热循环过程中裂纹产生的可能位置.

(2) 复合 SnPb 焊点的热循环寿命随低熔点 SnPb 焊料量的增加、基板焊盘尺寸的减小(即比值 R/r 减小)而增加.

(3) 焊点间隙和焊点的热循环寿命之间有直接的依赖关系,焊点间隙增大,焊点热循环寿命提高,并导出了复合 SnPb 焊点间隙和焊点热循环寿命关系的回归模型.

参考文献

[1] Thomas G. In: Bi K Y, Yu S W eds., *Proc 3rd Int Symp on*

Electron Packag Technology. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 435

- [2] Subbarrayan G, Li Y, Mahaglan R L. *ASME J Electron Packag*, 1996; 118: 148
- [3] Ju T H, Lin W, Lee Y C, Lim W. *ASME J Electron Packag*, 1994; 116: 242
- [4] Heinrich S M, Shaky S, Wang Y, Lee P S, Schroeder S A. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol*, 1996; 19B: 310
- [5] Wang G Z, Fang H Y, Wang C Q, Qian Y Y. *Chin Weld*, 1997; 6(1): 67
- [6] Brakke K A. <http://www.susqu.edu/facstaff/b/brakke/evolver>
- [7] Zhu Q N, Wang G Z, Luo L. In: Zhang M, Tu K N eds., *Proc 5th Int Conf on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, October, 21—23, 1998, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 554
- [8] Wilde J, Wang G N, Cheng Z N. *Proc 1999 Int Symp Advanced Packaging Materials*, March 14—17, 1999, Atlanta, USA, 1999: 144
- [9] Hong B Z. *J Electronic Mater*, 1997; 26: 814
- [10] Corbin J S. *IBM J Res Develop*, 1993; 37: 585
- [11] Lau J H. *Solder Reliability Theory and Applications*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991: 568