

焊点热应力应变分析与 HALT 热循环 温度剖面图优化

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机电工程研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 以统一型粘塑性 Anand 本构方程为基础, 采用非线性有限元方法研究了热循环试验过程中高低温端点温度、温度升降速率、高低温保持时间对 Sn63Pb37 焊点应力分布和塑性应变的影响, 并结合基于塑性应变的疲劳寿命预测 Coffin—Manson 公式, 分析了热循环试验效率与这些参数之间的关系, 为建立优化的 HALT (Highly accelerated life test) 和其它可靠性热循环试验温度剖面图提供有价值的参考。

关键词: 热循环; 粘塑性; 焊点可靠性; 热疲劳寿命; 非线性有限元分析

中图分类号: TN602 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2003)06—37—06

褚卫华



0 序 言

高加速寿命试验 (HALT, 即 Highly accelerated life test 缩写) 是美国 G. K. Hobbs 博士提出的采用强化应力快速有效地暴露产品设计薄弱环节和剔除制造工艺缺陷的一项新的电子产品可靠性试验技术^[1], 它与传统的可靠性模拟试验技术不同, 不能依据一定的试验标准来进行, 而是以快速激发产品的缺陷为目的, 因此如何选择优化的试验参数, 使 HALT 试验以更高的效率激发出产品的潜在缺陷将显得十分重要。尽管这项试验技术在 20 世纪 90 年代就开始在国外特别是美国得到推广和应用, 并在 20 世纪 90 年代中期引起中国可靠性工程界的关注, 但就 HALT 这项试验技术如何科学和高效率的实施仍然还没有相关研究文献报道。

文中将以组装有 EBG (Enhanced ball grid array, 即增强型球栅阵列) 封装器件的印制电路板为研究对象, 采用基于统一型粘塑性本构理论的 Anand 模型描述焊料的非线性行为, 运用非线性有限元方法研究焊点在高、低温保温阶段和温度升、降阶段应力变化和塑性应变累积情况, 并结合 Coffin—Manson 疲劳寿命预测公式, 研究 HALT 热循环试验中温度剖面参数的合理选择方法。

1 有限元模型的建立

所选 EBG 封装器件的大小为 35 mm×35 mm,

焊球直径为 0.75 mm, 间距为 1.27 mm。器件通过再流焊组装在 1.78 mm 厚的 PCB 板上。以系统总势能最小原理为基础, 采用美国 Minnesota 大学研究开发的 Surface evolver 软件对组装后的焊点形态进行预测^[2, 3], 得到组装完成后的焊球最终形态。焊球材料为 63Sn37Pb 共晶合金, 这种焊料的熔点较低 (约为 183 °C), 在电子封装的服役条件下, 其变形行为表现为粘塑性, 因此采用统一型粘塑性本构理论描述焊料的应力—应变关系, 其形式为^[4~7]

$$\text{流动方程: } \frac{d\epsilon_p}{dt} = A (\sqrt[m]{\sinh(\xi\sigma/S)}) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right). \quad (1)$$

$$\text{演化方程: } \frac{dS}{dt} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \frac{d\epsilon}{dt}, \quad (2)$$

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

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

式中: ϵ_p 为材料等效塑性应变, t 是时间, A 是指数因子, m 是应变敏感指数, ξ 是应力乘子, σ 是应力, S 是形变阻抗, Q 是粘塑性变形激活能, R 是波尔兹曼常数, T 是绝对温度, h_0 是硬化/软化常数, a 是与硬化/软化相关的应变率敏感指数, S^* 表示给定温度和应变率时 S 的饱和值, S^\wedge 是系数, n 是应变阻抗饱和值的应变率灵敏度, 另外, 为了求解微分方程(2)需要形变阻抗 S 的初始值 S_0 , 其它材料均采用线弹性材料模式描述其力学本构关系, 材料常数如表 1 所示。热循环过程中焊点的应力应变采用 Ansys 有限元软件进行分析, SnPb 焊料的单元类型为粘塑性单元 VISCO 107, 其它部分均采用 SOL-

ID45 单元, 网格划分后的模型与所施加的边界条件如图 1 所示。热循环加载按照美军标选取: 温度范围为 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$, 升温速率 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 高低温保温时间为 15 min, 零应力参考温度取 20°C 。

表 1 材料特性常数(T 为绝对温度)

Table 1 Material properties (T is absolute temperature)

Material	Elastic moduli/ MPa	CTE($10^{-6}/\text{K}$)	Poisson's ratio
63Sn37Sb	75482—152 T	24.5	0.35
Copper	120658	17	0.345
Substrate mask	3999	35	0.4
Substrate core	15168	13(x, y) 57(z)	0.195
Die attach adhesive	7377	52	0.3
Die	130311	2.6	0.278
Adhesive	1500	52	0.4
Aluminum	69000	24	0.34
PCB mask	4137	30	0.40
PCB core	27924—37 $T(x, y)$ 12204—16 $T(z)$	16(x, y) 84(z)	0.39($xz \& yz$) 0.11(xy)
Encapsulation	15513	15.0	0.25
Material			

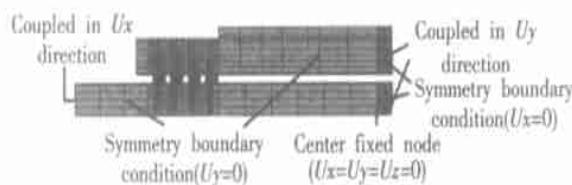


图 1 有限元模型与边界约束条件

Fig. 1 Finite element model with boundary conditions

2 温度剖面参数对焊点在热循环过程中应力应变与疲劳寿命的影响

从有限元分析结果可以知道: 在热循环过程中, 焊球中的应力呈周期性变化, 在低温保温阶段等效应力较高, 而在高温保温阶段等效应力较低, 并且塑性变形在整个变形过程中占主导地位, 塑性应变比弹性应变大 $2 \sim 3$ 个数量级, 因而塑性应变在焊球疲劳失效过程中起主要作用。塑性应变最严重的地方位于最外侧焊球与器件基底交界处, 图 2 是该处在第四周期塑性流动达到稳态后等效应力与等效塑性应变滞回曲线, 可以看出: 塑性变形在不同的阶段其累积速率是不同的, 在升温、降温和高温保温阶段累

积量都较大, 低温保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, 不同阶段的温度、应力分布和大小直接影响着焊点在各阶段的塑性变形。根据基于塑性变形的焊点疲劳寿命预测 Coffin-manson 公式:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon_f^- (2N_f)^c, \quad (5)$$

式中: N_f 为热疲劳寿命; $\Delta \epsilon_p$ 为塑性应变范围; ϵ_f^- 为疲劳韧性系数 ($\epsilon_f^- = 0.325$); c 为疲劳韧性指数 ($-0.5 \sim -0.7$)。可以知道: 在热循环各周期内的塑性应变范围与热疲劳寿命有直接关系, 所以可以通过优化选取温度剖面参数(温升速率、高温端点温度、高低温保持时间)的方法使循环周期和单周期塑性应变的改变达到最优值, 达到提高 HALT 试验效率的目的。

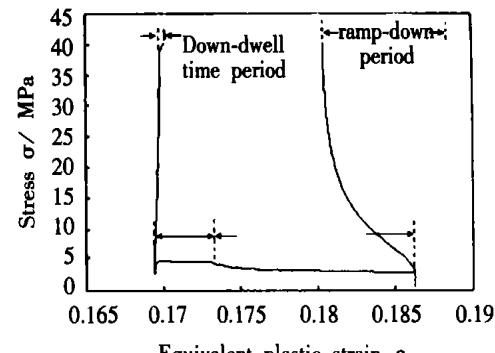


图 2 第四循环周期等效塑性应变—等效应力曲线

Fig. 2 Equivalent plastic strain versus equivalent stress during the forth cycle

2.1 高、低温保温阶段

为了研究高温保温阶段塑性应变累积过程, 将某周期高温保温时间延长至 8 h 后, 分析了整个保温过程中的等效应力和等效塑性应变变化过程, 保温阶段的等效应力随时间变化情况如图 3 所示。可以看出, 在高温保温阶段, 焊点出现显著的应力松弛现象, 保温阶段初期等效应力变化较大, 以很快的速度

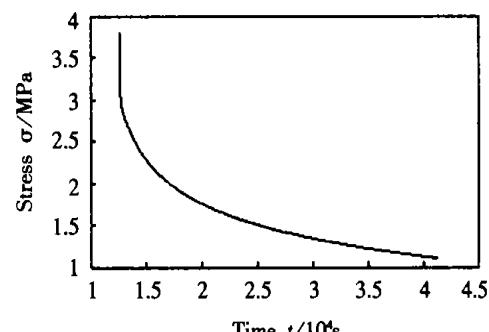


图 3 高温保温阶段 0~8 h 之间应力变化曲线

Fig. 3 Curve of stress in up-dwell time period(0—8 hour)

度迅速下降。随着保温时间的增加, 应力下降速度逐渐变缓; 等效塑性应变情况则相反, 在高温保温阶段初期塑性应变增长率较大, 随着保温时间的延伸, 塑性应变增长速度逐渐变缓。

高温保温阶段的应力松弛导致了较大的塑性应变累积, 这说明热循环试验可以通过延长高温保持时间来增加单周期塑性应变量, 达到减少焊点热疲劳试验所需循环周期数的目的。在热循环温度剖面其它参数保持不变的前提下, 温度变化范围取 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$, 温度升降速度取 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 低温保温时间取 15 min , 然后分别取不同的高温保持时间($0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30\text{ min}$), 通过数值计算可知: 高温保温阶段的等效塑性应变随着高温保温时间的延长不断增加, 并且在其开始阶段增长率最大。这从图 4 中可以明显的看出。高温保温阶段的塑性应变累积影响了整个热循环周期的塑性应变范围, 因而整个周期的等效塑性应变也随着保温时间的延长而不断增加。

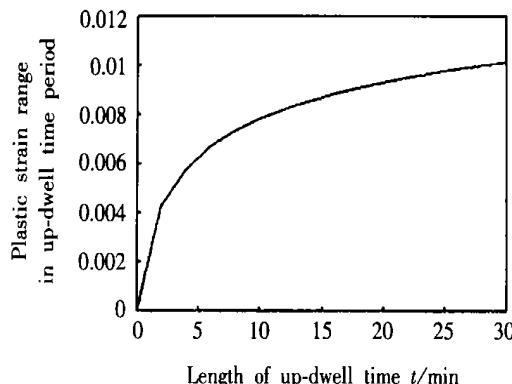


图 4 高温保温阶段塑性应变随高温保温时间变化曲线

Fig. 4 Plastic strain in up dwell time period
versus the length of up dwell time

根据单周期塑性应变随保温时间的变化关系以及 Coffin-masson 公式(5)可知, 随着高温保温时间的延长, 单周期塑性应变范围在增加, 这样必将导致焊点疲劳所需要的热循环周期数减少。计算结果还发现: 在高温保温时间很短的情况下, 疲劳寿命随着保温时间的延长急剧下降, 随后下降速度逐渐变慢, 当高温保持时间达到一定值后, 疲劳寿命变化基本趋于稳定。这是因为在高温保温阶段初期, 施加于焊点上的应力较大, 由于温度值很高, 塑性应变的发展很快, 从而导致与塑性应变累积有密切关系的焊点寿命急剧下降。随着应力松弛过程的进行, 应力逐渐下降, 从而导致塑性应变累积速率降低, 疲劳寿命下降速率也变慢。当然热循环周期数的减少并不说明所需要的整个试验时间也在缩短, 整个热疲劳试验所需要时间可据下列计算公式求出, 即

$$t_{\text{test}} = N_f T_c, \quad (6)$$

式中: t_{test} 表示整个热循环试验所需要时间; N_f 为热循环周期数; T_c 为单个循环周期所需要的时间。图 5 说明了试验时间 t_{test} 随着高温保温时间变化的过程, 可以看出, 在保温阶段初期, 试验时间随保温时间延长, 试验时间急剧降低, 一定时间后下降速度减缓, 到达某值后(10 min 左右)下降到最低点, 然后随着高温保温时间的增加, 试验时间开始上升。

对于低温保温阶段, 经研究可以发现, 随着保温时间的延长, 试验时间随着保温时间单调上升, 这是由于粘塑性应变过程是时间效应的热激活过程, 焊料应力松弛而导致的塑性应变和温度、应力水平有关, 低温阶段虽然应力值大, 但温度较低, 应力和应变随保温时间变化缓慢, 延长低温保温时间导致在单周期塑性应变增加很小的同时, 增加了单循环周期所需要的时间, 因而总试验时间大幅度提高。

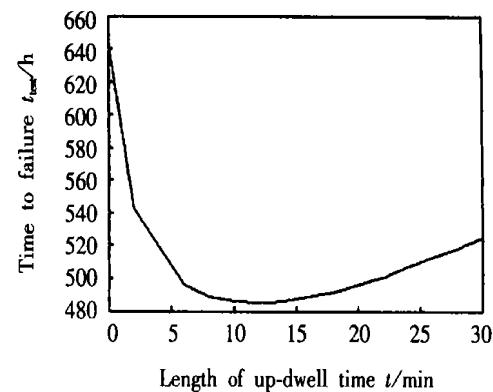


图 5 高温保温时间与试验时间之间的关系曲线

Fig. 5 Testing time versus length of up-dwell time

2.2 升、降温速率

在热循环温度剖面其它参数保持不变的前提下, 分别对不同温升速率条件下的焊点应力应变情况进行了分析。图 6 描述了焊球塑性流动达到稳态后单周期等效塑性应变随温升速率的变化情况, 可以看出: 在温升速率较低的情况下, 等效塑性应变随着温升速率的升高急剧下降, 随后等效塑性应变下降速度逐渐平缓, 当达到某值后等效塑性应变基本趋于稳定值, 这种现象是由于温升速率的变化同时影响了焊球材料在温升阶段和高温保温阶段应力松弛进行而产生的。在温升速率较高的情况下, 从低温上升到高温所需要的时间很短, 这个阶段焊球应力松弛不能充分进行, 从而导致温升阶段产生的塑性应变比较小; 当温升阶段温升速率较低时, 从低温上升到高温所需要的时间较长, 在这个阶段焊球应力松弛可以充分的进行, 因而温升阶段塑性应变范围也就比较大。温升速率在影响温升阶段塑性应变的同时又影响了高温保温阶段初始应力, 不充分的

应力松弛现象在高温保温阶段得到一定的补充。在温升速率较高的条件下, 因温升阶段应力松弛进行的不充分, 则高温保温阶段的应力值就比较高, 所以在高温阶段由于应力松弛现象而产生的塑性应变就大; 在温升速率较低的条件下, 因温升阶段应力松弛进行的比较充分, 焊球达到高温时作用于焊点的应力值较小, 在高温保温阶段的应力松弛就进行的比较缓慢, 这个阶段塑性应变就小。

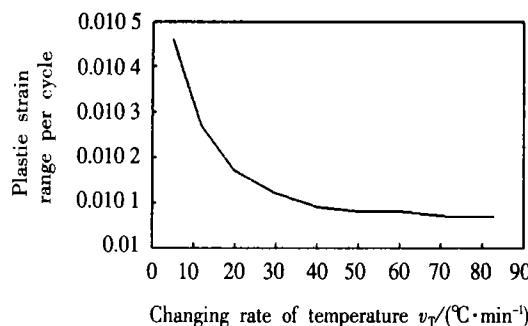


图 6 单周期等效塑性应变随温升速率变化曲线

Fig. 6 Plastic strain per circle versus ramp-up rate

总之, 提高温升速率在缩短热循环周期的同时也降低了单周期等效塑性应变范围, 据 Coffin-Manson 公式可知, 这将导致循环周期数的增加。因此要分析通过提高温升速率的方法是否对提高试验效率有效, 必须综合考虑这两方面的影响因素。另外, 在高温升速率的情况下, 由于温升阶段应力松弛进行的不充分, 到达高温时应力值较大, 高温变率的 HALT 试验更有必要通过高温保温阶段的应力松弛增加单循环周期的塑性应变, 提高试验效率。

降温速率的改变对热循环试验效率的影响与升温速率的影响基本一致, 但温升速率对塑性应变的影响比温降速率影响要大, 因而对热循环试验效率的影响也要大些。表 2 列出了在改变升、降温速率的条件下, 单周期塑性应变随温变率的变化情况, 以及所预测的疲劳寿命, 并对在升、降温速率分别取相同值的情况下进行了比较, 可以明显看出这一结果。

具体原因可以根据温升速率、温降速率对焊点在低温保温、升温、高温保温、降温各阶段的塑性应变的影响情况来加以说明。图 7 是各阶段塑性应变分别随温升速率、温降速率变化的情况, 将升温速率和降温速率对各阶段塑性应变影响情况相比较可以看出: 尽管提高温升速率较提高温降速率情况而言, 在温升阶段其塑性应变较有一定程度的下降, 但由于温升阶段不充分的应力松弛, 在高温保温阶段得到了充分的补充, 它在高温保温阶段塑性应变较降温速率改变情况而言要大的多; 提高降温速率同样导致其在降温阶段应力松弛进行的很不充分, 这种情况下与提高升温速率情况比较看出, 其塑性应变的下降的幅度很大, 尽管在低温保温阶段也存在应力松弛现象, 但由于该阶段温度较低, 因应力松弛所导致的塑性应变较小, 降温阶段的应力松弛进行不充分现象在低温保温阶段没有得到补充, 所以提高温降速率较提高温升速率其效果略差些。

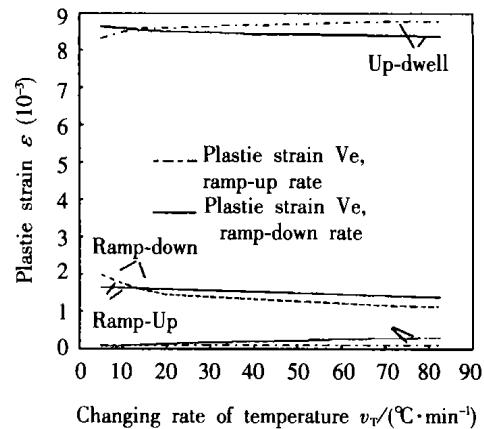


图 7 升降温速率对热循环各阶段焊点的塑性应变的影响

Fig. 7 Influence of ramp-up and ramp-down rate on plastic strain of soldered joints at different stage of a thermal cycle

尽管改变温升和温降速率都影响了热循环过程中不同阶段的应力松弛, 但从表 2 中看出, 提高升温和降温速率最终还是可以大幅度提高试验效率。

表 2 温升、温降速率对塑性应变和试验时间影响对照表

Table 2 Influence of ramp-up and ramp-down rate on plastic strain and test time

Ramping rate (°C/Min)	5	12	20	30	40	50	60	72	83
Plastic strain(ramp-up)10⁻²	1.046	1.027	1.017	1.012	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007
Plastic strain(ramp-down)10⁻²	1.071	1.027	1.01	0.9993	0.9927	0.9884	0.9846	0.9812	0.9786
Cycles to failure(ramp-up)	487.5	502.6	510.8	515.1	517.6	518.5	518.5	519.3	519.3
Cycles to failure(ramp-down)	468.6	502.6	516.8	526	531.9	535.7	539.2	542.3	544.7
Time to failure(ramp-up)(h)	658.1	502.6	459.8	437.8	427	420.5	414.8	411.1	408.3
Time to failure(ramp-down)(h)	632.7	502.6	465.1	447.1	438.8	434.5	431.3	429.3	428.2

2.3 高低温端点温度

热循环试验中,高温端点温度对焊点的塑性应变累积量有很大的影响。研究中发现,在热循环过程中无论高温变率还是低温变率,温升阶段的塑性累积过程主要发生在温度比较高的时刻。为深入分析高温端点温度对 EBG A 塑性应变累积和试验效率的影响,在保持热循环温度剖面其它参数不变的情况下,对高温端点温度分别为 95 °C、110 °C、125 °C、140 °C、155 °C 的焊点受力和塑性应变情况进行了比较,结果表明随着高温端点温度的升高,焊点在高温保温阶段的等效应力虽然略有下降。因温度升高,材料在温度和应力作用下的蠕变现象进一步增加,导致了温升、温降和高温保温阶段等效塑性应变增大。在高温保温阶段,应力松弛导致的塑性应变累积现象尤为突出,导致单周期塑性应变随高温端点温度的上升急剧增加。低温保温阶段的塑性应变变化较小,高温保持温度对该阶段几乎没有影响。热循环各阶段的塑性应变随高温端点温度的变化情况见图 8,高温端点温度的变化对塑性应变、循环周期和试验效率的影响情况见表 3。

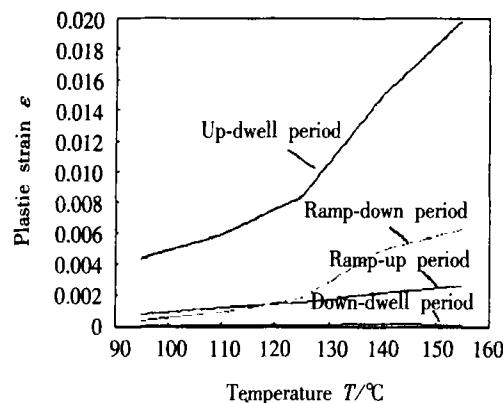


图 8 热循环各阶段塑性应变随高温端点温度变化曲线

Fig. 8 Plastic strain at different stage of a thermal cycle versus up-dwell temperature

表 3 高温端点温度对塑性应变和试验时间的影响

Table 3 Influence of up-dwell temperature on plastic strain and global test time

Maximum temperature T/°C	95	110	125	140	155
Plastic strain	0.00527	0.00742	0.01027	0.01741	0.02222
Cycles to failure	1527.1	863.9	502.6	208.5	139.1
Test time	1399.8	825.5	502.6	216.6	150.7

同样在保持其它试验参数不变的情况下,分别取低温端点温度为 0 °C、-10 °C、-25 °C、-40 °C、-55 °C、-70 °C、-85 °C,研究低温端点温度对焊点受力情况和塑性应变情况的影响,从计算结果中

发现:单周期塑性应变随着低温端点温度的降低而下降。这是因为随着低温端点温度的下降,低温保温阶段焊点所受等效应力虽然增加,但低温下焊点的形变阻抗变得很大,材料由于塑性流动而导致的应力松弛现象减小,从而导致低温保温阶段塑性累积减少。虽然其它阶段也受低温端点的温度有所变化,但变化都很小,几乎可以忽略不计。计算结果表明降低低温端点温度在延长循环周期的同时减少了单周期塑性应变范围,导致焊点疲劳时间延长。

3 试验方法与结果

以前面介绍的大小为 35 mm×35 mm 具有 352 个焊球的 EBG A 器件为试验对象,通过试验验证温度剖面中高温保温时间和低温端点温度对 HALT 热循环试验效率的影响。热循环试验过程中采用精密电阻测量仪对串联焊球的电阻变化情况进行了实时监测,高温保温对比试验中温度剖面参数为:高温端点温度 150 °C, 低温端点温度 -55 °C, 低温保持时间为 10 min, 温度升降速率为 15 °C/min, 高温保温时间分别取 2 min、5 min、10 min、15 min。试验过程中发现:当焊点产生裂纹并经扩展断裂后,电路的电阻在温升和温降阶段会发生剧烈的变化,到低温保温阶段后恢复稳定。特别是当最外侧焊点发生断裂时,其电路的电阻值会跳变到上百欧,甚至超出仪器测量量程,这是由于焊球出现断裂后因器件各组成部分的热膨胀系数不同导致热循环过程中焊球断裂面两侧出现相对运动,从而造成其接触电阻不断波动甚至出现时通时断现象。表 4 列出了高温保温时间选取不同值的情况下焊球平均疲劳寿命和失效时间,从试验结果中可以看出,高温保温时间的长短确实直接影响着热循环试验的试验效率,在高温保温时间取 10 min 的试验条件下焊点失效的平均时间明显低于其它三组试验,热循环试验中发生断裂的外侧焊点如图 9 所示。

表 4 不同高温保温时间条件下焊点的热循环试验平均寿命

Table 4 Mean thermal cycle lifetimes of soldered joints versus up-dwell time

Up-dwell time t/min	2	5	10	15
Mean lifetimes(cycle)	272	234	179.5	172
Test time t/hour	178.3	165.1	141.6	150

在低温端点温度对比试验中,温度剖面参数分别取:高温端点温度 150 °C, 高低温保温时间 10 min, 温度升降速率为 15 °C/min, 而对低温端点温

度取 -55°C 和 -10°C 的情况进行了试验比较, 试验结果见表 5。可以看出: 低温端点温度的升高因减少了疲劳周期数并缩短了温变时间, 从而导致试验总时间减少, 试验结果和有限元分析的结论基本一致。

表 5 不同低温端点温度条件下焊点热循环试验平均寿命

Table 5 Mean thermal cycle lifetimes of solder joints versus down-dwell temperature

The minimum temperature $T/^{\circ}\text{C}$	-55	-10
Mean lifetimes(cycle)	179.5	173
Test time t/h	141.6	119.2

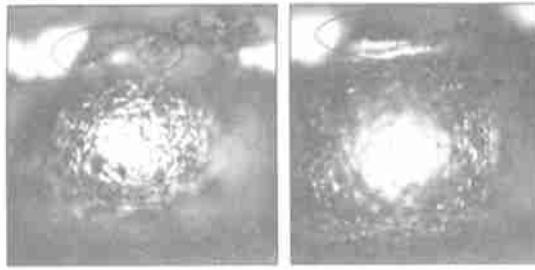


图 9 焊点疲劳断口

Fig. 9 Fatigue fracture of soldered joint

4 结 论

(1) 高温保温阶段存在着显著的应力松弛现象, 热循环试验可通过适当延长高温保温时间来达到提高试验效率的目的。

(2) 低温保持时间的选择可按以下情况考虑: 当低温端点温度较低时, 粘塑性变形阻抗值很大, 低温保温阶段塑性应变很小, 通过尽可能缩短低温保持时间(甚至取 0)来提高试验效率; 在低温端点温度和温降速率都很高的情况下, 由于降温阶段应力松弛进行的不充分, 导致低温保温阶段初始应力较高, 则可通过适当延长低温保温时间来增加塑性应变, 提高试验效率。

(3) 高的温升和温降速率尽管导致单周期塑性应变减少, 但它大幅度缩短了单个热循环所需要时间, 所以可以通过提高温变速率来大大减少试验时间; 另外由于高的温升速率导致温升阶段的应力松

弛进行的不充分, 因此 HALT 试验中的高温变率热循环试验更有必要通过高温保温提高试验效率。

(4) 单周期塑性应变随着高温端点温度的升高而迅速增加, 在试件工作性能和试验条件许可的条件下应尽可能提高高温端点温度来提高试验效率。

(5) 在低温端点温度较低的情况下, 低温端点温度的降低在延长循环周期的同时减低了单周期塑性应变范围, 因此在热疲劳试验中应尽可能采用高的低温端点温度来提高试验效率; 另外由于低温端点温度的降低会大大增大低温保温阶段焊点应力, 可采用较低的低温端点温度和较少的几个热循环检验焊点静态强度。

参考文献:

- [1] 褚卫华, 陈循, 陶俊勇. 高加速寿命试验(HALT)与高加速应力筛选(HASS)[J]. 强度与环境, 2002, 29(4): 23~37.
- [2] 朱奇农, 王国忠, 罗乐. 倒装焊中复合 SnPb 焊点形态模拟[J]. 电子学报, 2000, 28(5): 55~58.
- [3] Sidharth, Richard Blish, Devendra Natekar. Solder joint shape and prediction and integration with FEA-based methodology for reliability evaluation [C]. IEEE, Electronic Components and Technology Conference 2000 1739~1745.
- [4] Gustafsson G, Guven I, Kradinov I et al. Finite element modeling of BGA package for life prediction [C]. IEEE, 2000 Electronic Components and Technology Conference 2000 1059~1063.
- [5] Bret A Zahn. Finite element based solder joint fatigue life predictions for a same die stacked chip scale ball grid array package [C]. IEEE, International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2002 274~285.
- [6] LeiLei Zhang, Soo-Shin Chee, Abhay Maheshwari, et al. Experimental and finite element analysis of cavity down BGA package solder joint reliability [C]. IEEE, Electronics Packaging Technology Conference 2000 391~397.
- [7] Biju Chandran, Deepak Goyal, Jeffrey Thomas. Effect of package design and layout on BGA solder joint reliability of an organic C4 package [C]. IEEE, 2000 Electronic Components and Technology Conference 2000 1205~1214.

作者简介: 褚卫华, 男, 1968 年出生, 博士研究生, 主要从事电子设备可靠性试验技术研究, 在国内核心期刊发表论文 10 篇。

Email: nudt-cwh123@163.com