

[文章编号] 1004- 0609(2000) 03- 0411- 05

表面组装焊点内部应力—应变场的数值模拟(II)^①

——焊点失效的主控力学因素

钱乙余¹, 马 鑫¹, 吉田综仁²

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 广岛大学 工学部弹塑性工学研究室, 日本, 739)

[摘 要] 温度循环载荷可以在焊点界面处形成足以导致空洞损伤发生的高应力三轴度。针对温度循环载荷下软钎焊焊点界面空洞损伤的失效行为特点, 结合焊点内部应力—应变场分布特征及其温度历史相关性, 提出了相对损伤应力这一概念, 并以此作为温度循环载荷下软钎焊焊点失效的主控力学因素。分析了温度历史不同阶段对焊点失效行为的影响, 结果表明高温保温阶段焊点内部最容易发生空洞损伤。

[关键词] 相对损伤应力; 主控力学因素; 空洞损伤; 温度历史

[中图分类号] TG404

[文献标识码] A

表面组装焊点在环境温度循环条件下的失效现象是导致微电子装联失效的主要原因^[1]。针对焊点在温度历史下的失效行为, 国外学者进行了广泛的试验研究。试验方法主要是测试表面组装焊点的热疲劳寿命和软钎焊焊点的等温疲劳行为。前者可以用于评价不同的软钎焊工艺及不同的焊点形式结构对热疲劳寿命的影响, 但由于表面组装焊点结构的微细特征, 温度循环试验过程中对焊点内部力学信息变化的实时测量极为困难, 因此热疲劳试验可得到的有价值信息仅为疲劳寿命^[2]。后者虽然可以通过巧妙的试验设计得到等温疲劳过程中焊点部位的应力—应变实时信息^[3,4], 但由于标准温度循环试验涉及的温度范围较大(按照美国军标为- 55~ + 125 ℃), 因此如果考察不同温度的影响, 试验工作量是相当大的。

有限元数值模拟方法是用于节省试验资源和指导试验设计的有效方法。文献[5]中的研究表明, 温度循环载荷下焊点内部的应力—应变场分布具有动态特性而且与温度历史相关。因此, 正确评价温度循环历史不同阶段在焊点失效过程中所起的作用, 确定出对焊点失效行为起主要作用的温度区间, 将有助于等温疲劳试验设计和节省试验资源。

焊点失效是其内部力学条件和金属学条件共同作用的结果, 而归根结蒂是力学条件作用的结果。本文的研究目的即是结合焊点失效的物理特征, 在界面断裂力学分析的基础上提出主控温度循环载荷

下焊点失效行为的力学参数, 并以此来评价温度循环历史不同阶段对焊点失效行为的影响。

1 软钎焊焊点的失效行为

软钎焊焊点是电子设备中微电子元器件与印刷电路板进行机械连接和电连接的重要纽带。从钎焊的角度来看, 表面组装焊点是一种软钎焊搭接接头, 其结构特点是一薄层韧性的软钎料合金受到相对刚性的陶瓷芯片载体和树脂基板的约束。由于陶瓷芯片载体和树脂基板之间存在热膨胀系数差(前者一般为 $6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 后者一般为 $20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 焊点服役环境的温度循环或设备自身的功率循环将导致焊点内部产生热应力和热应变, 而构成焊点的韧性软钎料合金的非弹性变形由于受到结构约束而呈现界面韧性断裂特征, 即界面空洞损伤失效。图 1 为 80 ℃下软钎焊搭接焊点的等温机械疲劳断口, 其他研究者在软钎焊焊点的热循环疲劳试验及等温机械疲劳试验的研究结果也证明了这一失效特征^[6~9]。

2 应力三轴度与软钎焊焊点的界面空洞损伤

Ashby 等人首先深入研究了受到高度约束的韧性金属的流动变形机制, 指出约束因子(最大主应力/屈服应力)对其内部空洞长大起主控作用^[10]。

① [收稿日期] 1999- 06- 28; [修订日期] 1999- 10- 26

[作者简介] 钱乙余(1937-), 男, 教授, 博士生导师。

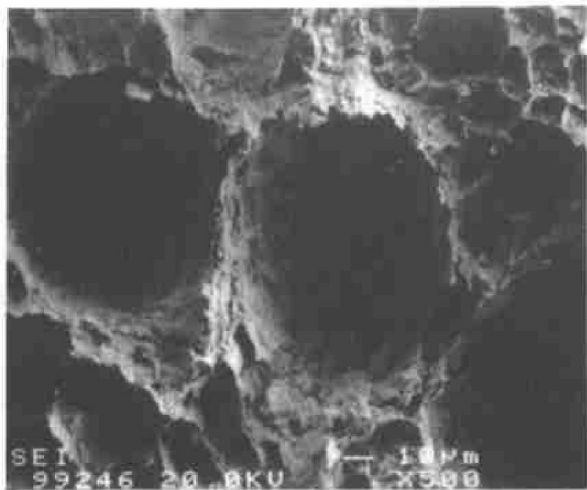


图1 软钎焊焊点等温机械疲劳断口(80 °C)

Fig. 1 Isothermal mechanical fatigue fracture of solder joint at 80 °C

Varas, Tvergaard, Huang 等人进一步提出将应力三轴度作为结构约束度的评价指标, Huang 还针对电子封装中的金属化层薄膜的失效问题进行了分析^[11~14]。本小节基于 Huang 的临界空洞损伤应力三轴度的解析解^[14]和 SMT 模拟焊点内部应力三轴度的有限元数值模拟结果, 讨论温度循环载荷下焊点界面处应力三轴度是否可以导致达到导致空洞失稳扩展的量值。

钎焊工艺中靠熔融钎料合金流动填缝来形成钎缝, 钎料合金的流动特性及钎剂成分的气体挥发导致钎缝中不可避免地存在空洞类缺陷。对于含初始缺陷固体, Huang 的理论认为, 空洞演化过程中的静水应力存在一极值, 超过此值后空洞将长大进入失稳状态, 而无需外加应力的增加。其相对应的应力三轴度可称为空洞失稳临界应力三轴度, 表达式为

$$\frac{\sigma_{\text{cavitation}}}{\sigma_y} = \frac{2}{3} \left[1 - \frac{\sqrt{1+4\eta}-1}{2\eta} + \ln \frac{2E}{3\sigma_y} + \ln \frac{\exp \left[(\sqrt{1+4\eta}-1) V_f/2 \right] - 1}{\exp \left[(\sqrt{1+4\eta}-1) V_f/2 \right] - 1 + V_f} \right] \quad (1)$$

式中 σ_y —屈服应力, E —弹性模量, V_f —初始空洞类缺陷体积分数, $\eta = 3\sigma_y/2EV_f$ 。

图2为4种规范(见表1)温度循环载荷下 SMT 模拟试件焊点界面处应力三轴度数值模拟结果, 焊点结构形式及数值模拟方法见文献[5]。图3为根据式(1)计算得出的 Sn60-Pb40 钎料合金的空洞损伤临界应力三轴度, 可见初始缺陷率为 5%~10% 时(这种缺陷水平的焊点属于良好焊点), 临界应力三轴度值为 2~2.5。与图3比较可知, 在温度循环

历史的保温阶段, 特别是在其高温保温阶段, 焊点界面处的应力三轴度接近或超过空洞损伤所需的临界值, 即从力学角度而言, 温度循环载荷在焊点内部形成的应力场可以导致空洞损伤发生。

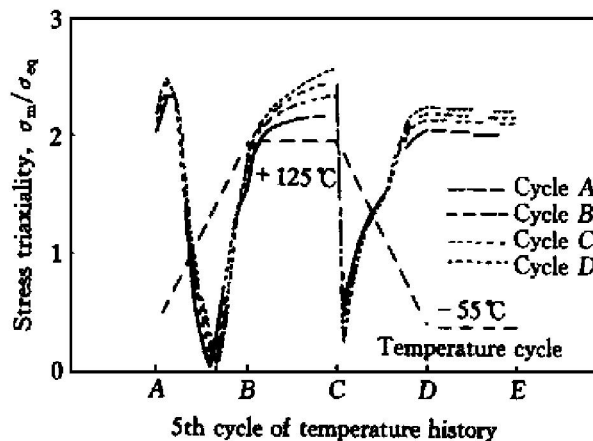


图2 温度循环载荷下焊点界面处应力三轴度的 FEM 计算结果

Fig. 2 Calculation results of stress triaxiality at interface of solder joint under temperature cycling

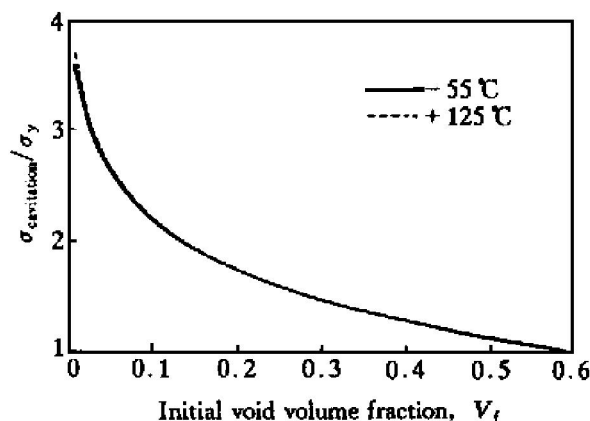


图3 Sn60-Pb40 钎料合金空洞损伤临界应力三轴度
Fig. 3 Critical stress triaxiality for cavitation of Sn60-Pb40 solder alloy

需要指出的是, Huang 的理论中所采用的应力三轴度表达式为静水应力/屈服应力, 而不是传统的静水应力/Mises 等效应力。这是因为 Huang 的理论针对的是材料本身而不是结构, 因此无法获得等效应力值。考虑到发生韧性损伤的区域一般也已经屈服, 上述结论是可以成立的。

3 软钎焊焊点界面失效行为的主控力学因素

应力三轴度水平固然可以反映出发生空洞损伤的可能性, 但还不能包含结构失效过程中起影响作用的所有力学因素, 因此在确认软钎焊焊点界面空

表 1 有限元分析中采用的 4 种温度循环载荷规范

Table 1 Four kinds of temperature cycling specifications used in FEM analysis

Cycle	Max. temp. / °C	Min. temp. / °C	Temp. range / °C	Hold time / min	Ramp time / min	Ramp rate / (°C·min ⁻¹)
Cycle A	125	- 55	180	15	15	12. 0
Cycle B	125	- 55	180	7. 5	7. 5	24. 0
Cycle C	125	- 55	180	5. 0	5. 0	36. 0
Cycle D	125	- 55	180	3. 0	3. 0	60. 0

洞损伤失效机制、空洞损伤发生可能性以及温度循环载荷下焊点内部力学参量分布具有温度历史相关性之后, 我们可以建立软钎焊焊点温度循环载荷下失效的主控力学因素表达式。

Lemaitre 作为现代损伤力学的奠基人之一, 指出应变能密度释放速率, 即损伤发生时材料单元刚度损伤导致的能量耗散, 是主控损伤过程的热力学相关变量。通过严谨的热力学和细观力学分析, Lemaitre 提出了一个包含应力三轴度函数在内的等效损伤应力概念, 并将其作为损伤过程的力学评价指标^[15]:

$$\sigma^D = \sigma_{eq} R_v^{1/2} \tag{2}$$

式中 σ^D —等效损伤应力, σ_{eq} —Mises 等效应力, R_v —应力三轴度函数,

$$R_v = \frac{2}{3} (1 + \nu) + 3 (1 - 2 \nu) \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right]^2 \tag{3}$$

式中 ν —泊松比, σ_H —静水应力, σ_H / σ_{eq} —应力三轴度。

上述表达式的物理基础已经得到了公认^[10~15]: 滑移引起的塑性由等效应力主控, 而不是取决于静水应力; 空洞失稳的损伤过程与静水应力或应力三轴度相关, 而且这一现象受到主控弹性体积变化的泊松比的影响。如文献[5]中所述, 温度循环载荷下焊点内部的应力场分布具有温度历史相关性, 因此式(2)所得结果自然也具有温度历史相关性。但同时还必须考虑到不同温度下构成焊点的软钎料合金的力学性能也有很大差别, 因此要对不同温度下的损伤等效应力作出比较, 必须对其进行温度归一化, 为此本文引入相对损伤应力概念:

$$\sigma^* = \sigma^D / \sigma_y(T) \tag{4}$$

式中 σ^* —相对损伤应力, $\sigma_y(T)$ —屈服应力, 是温度的函数。这一概念包含了与空洞损伤直接相关的应力三轴度、与基体材料塑性变形相关的等效应力以及反映不同温度下材料力学性能变化的屈服应力, 体现了温度循环载荷下软钎焊焊点失效过程的

特点——界面空洞损伤和温度历史相关性。

需要指出的是, 之所以称为相对损伤应力, 是因为它是一个综合反映软钎焊焊点界面失效行为特点及其韧性损伤机制的主控力学因素, 但不是失效判据, 它是通过对不同温度阶段时其量值的比较就损伤发生可能性作出评价。图 4 为温度循环历史不同阶段 SMT 模拟焊点界面处的相对损伤应力比较。Mises 等效应力和应力三轴度均由有限元数值模拟得来, 有限元数值模拟方法、作为温度函数的屈服应力和泊松比值见文献[5], 横坐标与温度循环历史的不同时刻相对应。由图可见高温保温阶段的相对损伤应力值最大, 也就是说, 空洞损伤过程最容易在这一阶段发生。

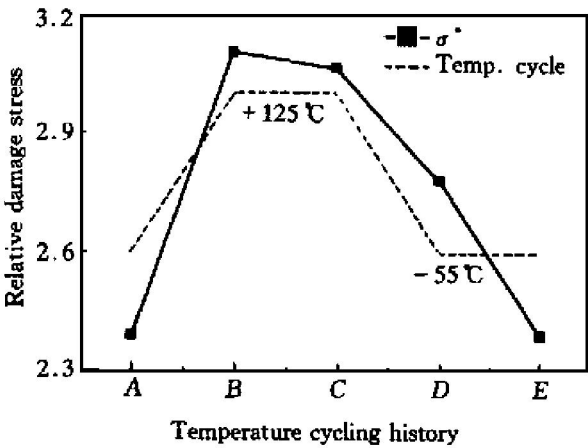


图 4 温度循环历史不同阶段焊点界面处相对损伤应力比较

Fig. 4 Comparison of relative damage stress at interface of solder joint during different stage of temperature cycling

4 讨论

在关于 SMT 焊点可靠性的有限元力学分析中, 国外学者一般着眼于某一温度时刻的等效应力分布。文献[5]中已经指出循环温度载荷下焊点内部应力场分布具有动态特性, 不能仅以某一时刻的

力学参量分布图作为分析基础。本文进一步指出, 鉴于软钎焊接头界面空洞损伤的失效行为特点, 仅分析等效应力这一力学参量也是不足的。相对等效应力概念的提出弥补了上述缺点。另一方面, 文献[5]中的分析指出温度循环历史中焊点内部的力学参量历史也具有循环特性, 如果假设不同循环周数的同一温度时刻软钎料合金的屈服应力相同, 则相对损伤应力也具有循环特性。也就是说, 相对损伤应力的决定因素是空洞损伤发生的可能性, 而空洞的长大以致最终失效还取决于应变场的特征——非弹性应变的不断累积, McClintock-Rice-Tracy 的经典空洞长大公式为

$$V = 0.85 V_p \exp \left[\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_{eq}} \right] \quad (5)$$

式中 V 和 V_p 分别为空洞体积及其长大速率, $\dot{p}$ 为累积塑性应变速率。显然, 空洞体积与累积非弹性应变成正比(将式(5)积分即得), 空洞体积长大到一定程度后结合面会弱化而导致裂纹萌生。文献[5]中的分析结果表明, 整个温度循环历史过程中最大累积非弹性应变位置位于焊点内侧焊趾部位, 因此在空洞损伤发生的条件得到满足后, 宏观裂纹将起源于该部位, 这是与试验观察结果相符合的^[6]。

5 结论

1) 界面断裂力学分析和 FEM 计算结果表明, 温度循环载荷可以在焊点界面处形成足以导致空洞损伤发生的高应力三轴度。

2) 针对 SMT 焊点的环境温度循环服役条件, 对 Lemaitre 等效损伤应力进行了温度归一化, 提出了相对损伤应力概念, 并以此作为温度循环载荷下软钎焊焊点失效的主控力学因素。该概念能够反映出焊点空洞损伤的失效行为特点及其内部应力场的温度历史相关性。

3) 基于相对损伤应力概念分析了温度循环历史不同阶段对焊点失效行为的影响。结果表明高温保温阶段最容易发生空洞损伤。

[REFERENCES]

- [1] Plumbridge W J. Solders in electronics [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31: 2501– 2514.
- [2] Basaran C and Chandaroy R. Finite element simulation of the temperature cycling tests [J]. IEEE Trans CPMT Part A, 1997, 20(4): 530– 536.
- [3] Solomon H D. Fatigue of 60/40 solder [J]. IEEE Trans CHMT, 1986, 9(4): 423– 432.
- [4] Hall P M, Dudderar T D and Argyle J F. Forces, moments and displacement during thermal chamber cycling of leadless ceramic chip carriers soldered to printed boards [J]. IEEE Trans CHMT, 1984, 7(4): 314– 327.
- [5] MA Xin(马 鑫), QIAN Yiyu(钱乙余) and Yoshida F. 表面组装焊点内部应力—应变场的数值模拟(I) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10(3): 404– 410.
- [6] ZHU Ying(朱 颖). 锡铅稀土钎料 SMT 焊点热循环失效机制研究 [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996. 45.
- [7] MA Xin(马 鑫), WANG Guozhong(王国忠), FANG Hongyuan(方洪渊), et al. 剪切载荷下软钎焊接头界面失效行为 [J]. Transaction of the China Welding Institution(焊接学报), 1997, 18: 44– 49.
- [8] Logsdon W A, Liaw P K and Burke M A. Fracture behavior of 63Sn/37Pb solder [J]. Engng Fracture Mech, 1990, 36: 183– 218.
- [9] Skipor A F, Harren S V and Botsis J. The effect of mechanical constraint on the flow and fracture of 63/37 Sn/Pb eutectic alloy [J]. Engng Fracture Mech, 1995, 41: 647– 669.
- [10] Ashby M F, Blunt F J and Bannister M. Flow characteristics of highly constrained metal wires [J]. Acta Metall, 1989, 37(7): 1847– 1857.
- [11] Varias A G, Suo Z and Shih C F. Ductile failure of a constrained metal foil [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39: 963– 986.
- [12] Tvergaard V, Huang Y and Hutchinson J W. Cavitation instabilities in a power hardening elastic-plastic solid [J]. Eur J of Mech A/Solids, 1992, 11(2): 215– 231.
- [13] Huang Y, Hutchinson J W and Tvergaard V. Cavitation instability in elastic plastic solids [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39: 223– 241.
- [14] Huang Y, Hu K X, Yeh C P, et al. A model study of thermal stress-induced voiding in electronic packaging [J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 1996, 118(4): 229– 234.
- [15] Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics [M]. New York: Springer-Verlag, 1996. 39– 46.

Finite element analysis of stress-strain distribution characteristics in SMT solder joints(II)

——Dominant mechanical factor responsible for failure of solder joint

QIAN Yiyu¹, MA Xin¹, F. Yoshida²

(1. National Key Laboratory of Welding,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China;

2. Department of Mechanical Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, 739, Japan)

[Abstract] Interface void damage is the failure characteristic of solder joint under temperature cycling. Based on the distribution feature and temperature history relativity of stress-strain field in the solder joint, the concept of relative damage stress was put forward as dominant mechanical factor responsible for the failure of solder joint. Analysis results showed that it is easiest for void damage to occur in the high temperature holding time during temperature cycling history.

[Key words] relative damage stress; dominant mechanical factor; void damage; temperature history

(编辑 袁赛前)