



热力耦合场下互连微焊点的疲劳寿命分析

朱桂兵^{1,2}, 汪春昌², 刘智泉³

(1. 南京信息职业技术学院, 江苏 南京 210046; 2. 安徽大学, 安徽 合肥 213001; 3. 香港科技大学机械工程系, 香港)

摘要: 该文设计热循环和跌落耦合冲击试验, 选用 $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$ (SAC305) 和 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ (Sn-37Pb) 两种焊料制成焊球, 以芯片尺寸封装(CSP)芯片为研究基底, 焊盘分别进行 Ni/Au 化学电镀和有机保焊膜涂覆两种工艺处理, 研究该环境对 CSP 微尺度焊点疲劳寿命的影响。结果表明: CSP 微尺度焊点的失效模式是先快后慢, 初期失效的变化率最高, 产品具有固有的耐耦合冲击能力, 无铅焊点更适用于低周热循环和低能级跌落耦合冲击环境, 有铅焊点的抗跌落冲击能力较强, Ni/Au 处理的焊盘配合无铅焊球制成的 CSP 器件具有更高的耐高周耦合冲击可靠性, 焊点的失效机制是由离散的空洞逐渐向界面裂纹转变。

关键词: 微尺度焊点; 热力耦合; 芯片尺寸封装; 失效机制

中图分类号: TG425

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)08-0033-05

Analysis on fatigue life of interconnection micro-scale solder joint under thermal-drop coupling cycling loads

ZHU Guibing^{1,2}, WANG Chunchang², LIU Zhiquan³

(1. Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing 210046, China; 2. Anhui University, Hefei 213001, China; 3. The Hong Kong University of Science and Technology, HongKong, China)

Abstract: The coupling impact testing between thermal cycling with dropping were designed, and the two kind of selected solder material $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$ (SAC305) and $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ (Sn-37Pb) were used to make solder ball for chip size package(CSP) chips that was used as the research substrate. The two kind processes of electroless nickel immersion gold(ENIG) and organic solderability preservative(OSP) were used to deal with the pads, the effect of the environment on the fatigue life of micro-scale solder joint was studied. The results indicated that the failure mode of micro-scale solder joint of CSP is fast first and then slow, and the speed of failue rate is the most highest in the the condition of relatively lower cycles coupling impacting, and an inherent ability of anti-coupling impacting exists in the electronic product, and the lead-free solder joint is more suitable for the coupling impacting environment between the low cycle thermal cycling and low energy level dropping, and the ability of anti-dropping impacting is relatively high for the lead solder joint. The relatively higher reliability of high cycle anti-coupling impacting can exist in the CSP micro-scale solder joint made by ENIG pads and lead-free solder balls than it, and the failure mechanism of solder joint is a transition from discrete void to interface crack.

收稿日期: 2019-02-01; 收到修改稿日期: 2019-03-10

基金项目: 南京信息职业技术学院重点科研基金项目(YK20160203); 国家自然科学基金资助项目(51502001,51572001); 江苏省“青蓝工程”项目资助(JSQJ2017-06);

作者简介: 朱桂兵(1979-), 男, 江苏南通市人, 高级工程师, 副教授, 博士, 主要从事微电子封装可靠性、介电功能材料研究。

Keywords: micro-scale solder joint; thermal-drop coupling; chip size package (CSP); failure mechanism

0 引言

芯片尺寸封装(chip size package, CSP)器件是便携式消费类电子产品中使用率最高的封装器件之一。在这种封装体中,互连微尺度焊点(CSP焊点)是其最重要的组成部分,承担着机械支撑、电气连接和散热3种核心功能,焊点的疲劳寿命决定了CSP芯片的寿命,然而在电子产品的制造和实际使用过程中该焊点往往需要承受多种力场的综合作用^[1-2]。

近年来,关于热载荷冲击、跌落冲击、碰撞振动^[3]、时效变形^[4],电载荷冲击以及电迁移^[5]等力场独立作用在CSP焊点身上的力学行为的研究多有见诸报道,然而在实际生产与应用过程中,这些力场往往会形成耦合作用。此外,随着封装尺寸进入了微米量级,导致这种焊点的尺寸效应与传统的毫米级焊点有了很大的不同,文献研究表明当焊点体积小于 $6.96 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ 时^[6],从焊接点处获取反馈信息并反作用在焊点上的通道将变得滞后或者不可靠,关于这一点,已经有不少学者进行了研究,尹立孟等^[6-7]从高度和体积等角度对微尺度焊点的单一力学行为进行研究,梁颖等^[8]从三点弯曲应力应变的角度对焊点力学行为进行了分析,田红艳^[8-9]、Zha^[10]等对热循环载荷环境下不同金属间化合物(intermetallic compounds, IMC)的形状和厚度对微尺度焊点可靠性影响进行了研究,应该说这些研究角度均有较大的开拓性,但是他们对这种焊点的生存环境设计过于单一,因此研究耦合力场环境对CSP焊点疲劳寿命的影响是十分有必要的。

对便携式电子产品而言,环境温度升高和外力冲击的综合作用将导致其重要组成部分CSP焊点产生塑形变形、热蠕变疲劳变形以及脆性断裂等力学行为^[11-12],作用在焊点身上的合力将加剧残余应力在该点的局部集中与非线性扩张,最终使得累积的应变突破了阈值,关于这点我们也认同,但是能够承受的合理的极限合力是多少呢,这一点还有待进一步证实。萌生和扩展是疲劳裂纹的两个生长阶段^[13]。裂纹一般以穿晶裂纹开始,贯穿沿晶断裂的方式^[14]形成于焊点内部及IMC层分别与富Cu层、富Sn层的接触处。组成IMC层的主要成份 Cu_6Sn_5

和 Cu_3Sn 的比例并不固定,其不仅与IMC形成阶段的焊接温度有关,还与服役阶段受到的热冲击有关,鉴于 Cu_6Sn_5 在IMC中的占比高低与焊点的疲劳寿命呈现正相关性^[15-16],因此 Cu_6Sn_5 占比低的焊点一旦面临高强度机械冲击振动时,其防御体系极易受到破坏,最终将引发焊点形成疲劳断裂和元器件失效^[11,17],于是控制 Cu_6Sn_5 的占比变得很重要。

本文将CSP器件作为研究基底,选用不同处理工艺的焊盘,以限定次数的热循环冲击和不限次数的跌落冲击两个便携式电子产品最常见的力场按照正交试验法组成的耦合条件对样品进行破坏性检测,充分克服单一力场模拟现实环境对样品测试带来的不真实感,研究CSP微尺度焊点的失效模式和机理,并针对性地从设计与生产工艺的角度提出改善方法。

1 试验方法与试验板设计

1.1 试验方法

考虑到微尺度焊点的失效机理及便携式电子产品的质量需求,根据现有的文献按照IPC-9701标准选用东莞环瑞测试设备公司的RTS-300高低温循环冲击试验箱,同时根据JESD-22标准选用双臂跌落试验系统。前者可连续进行 $-55 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷热循环测试,选用热循环温度加载条件为 $-40 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$,边界温度各恒温900 s,升温速率为 $16.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,一个循环周期约为3000 s,分别进行100, 500, 1000及1500周热循环冲击(TC),监控样品的通电情况,确保样品连续合格;后者包括跌落试验机,示波器,应变片,冲击加速度计等,样品被固定在试验机的跌落台上部的基座上,并与其保持40 mm的间隙,利用冲击加速度计算出待测试验的冲击条件,利用示波器监测应变片通过菊花链传递过来的动态信息,并据此判断样品是否失效及试验寿命。

待测样品进入热循环冲击测试之前必须经过电性能检测和X-ray扫描以确保其合格,在设定的热循环测试过程中也要进行实时电性能监控以确保样品导电性能正常,然后才能进行有实时通电监控的跌落冲击测试,直至样品失效,读取测试结果,对样品进行失效分析,试验过程如图1所示。

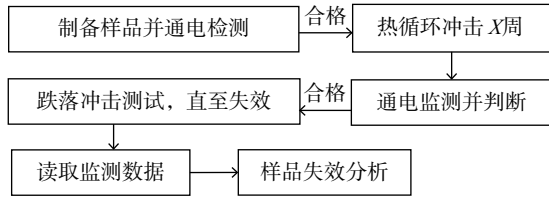


图 1 试验过程

根据标准选择 100 g, 2 ms, 500 g, 1.0 ms, 900 g, 0.7 ms, 以及 1 500 g, 0.5 ms 4 种常用的跌落冲击试验条件, 使用式(1)、式(2)对试验条件进行校正。

$$\sqrt{2gh} = 2A_0t_w/c\pi \quad (1)$$

$$A(t) = A_0 \sin(\pi t/t_w) \quad (2)$$

式中: A_0 ——峰值加速度;

$A(t)$ ——某一时刻的最大加速度;

t_w ——跌落的半脉冲周期;

h ——跌落高度;

c ——有($c=1$)无($c=2$)撞击反弹。

1.2 试验板设计

基于测试的便捷性, 数据的有效性与可用性进行试验板设计, 具体布局如图 2 所示。元器件选择 2 块封装尺寸为 7 mm×7 mm×0.80 mm 的 CSP, 其晶圆尺寸为 5.8 mm×5.8 mm, 引脚间距为 0.6 mm, 焊球直径为 0.4 mm, 焊球材料选择无铅焊料 SAC305 和有铅焊料 Sn-37Pb 两种材料, 测试印制电路板板 (printed circuit board, PCB) 使用符合 RoHS 标准的 FR-4 S1170 环氧玻纤板, 外形尺寸为 80 mm×80 mm×1.05 mm, 玻璃化转变温度为 175 °C, 焊盘选用通用型的非阻焊层限定焊盘, 焊盘分别进行 Ni/Au 化学电镀和有机保焊膜 (organic protective film, OSP) 涂覆两种工艺, 实验分组如表 1 所示。由文献可以看出个别焊点的失效是 CSP 器件整体失效的起因, 且这些失效焊点更多分布在 CSP 器件底部的 4 个角处^[12], 将 CSP(U1) 和 CSP(U2) 的

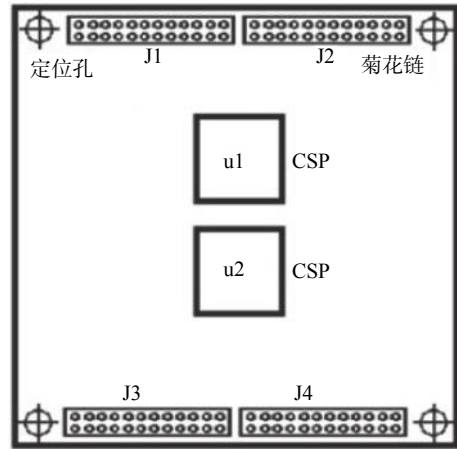


图 2 试验板设计

表 1 试验分组

试验组	焊球材料	焊盘处理
a	SAC305	Ni/Au
b	SAC305	OSP
c	Sn ₆₃ Pb ₃₇	Ni/Au

4 个角处的焊点用菊花链状引线串连起来, 每条链均包括两个被连接到 J1 至 J4 处的 I/O 端口, 通过给输入端口输入测试电流, 通过示波器观测输出端口的电流变化曲线观测样品失效情况。

2 试验结果与讨论

图 3(a)~(c) 显示了 3 种样品在不同热循环冲击和不同跌落冲击耦合条件下的可靠性寿命, 可以看出随着热循环冲击的增加, 3 种样品的耐热可靠性寿命明显呈现相似的下陷趋势, 且下陷形态均为先快后慢的形态。在 300 周 TC 以内样品的耐跌落冲击能力快速下降, 样品的耐跌落冲击寿命与热冲击循环时间呈现反指数级变化。这一点预示着便携式电子产品在受热环境下工作初期有较大的失效风险, 当热循环冲击超过 300 周后, 样品的失效变化

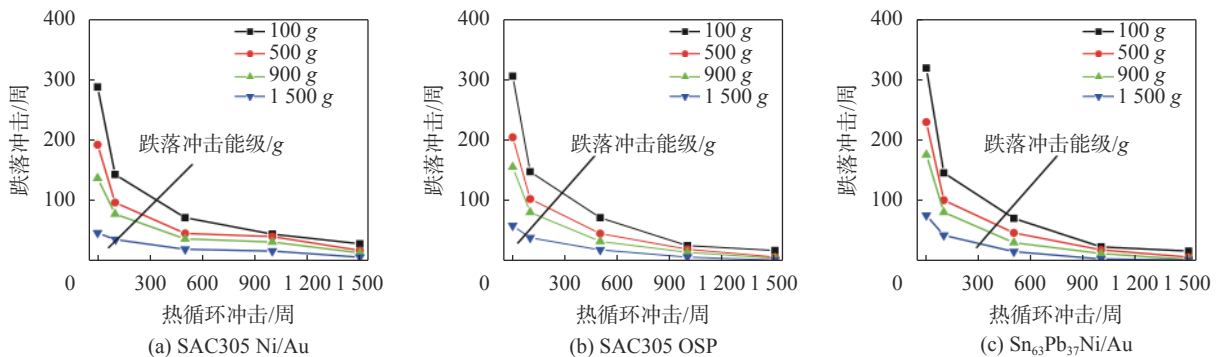


图 3 3 组样品在不同热循环冲击条件下的耐跌落冲击可靠性

率明显低于前者,通过这一点可以推测在工作稳定期不失效的样品往往也具有较高的耐热冲击能力,电子产品制造企业有效地完成该类测试将有利于合理控制质保期,维护企业的信誉。

通过对失效的 CSP 器件进行染色试验(Dye&Pry)和微尺度焊点金相剖样(cross-section)分析,可以清晰地观测焊点的失效行为和位置。图 4(a)为失效 Dye&Pry 图,角落有明显的失效焊点,图 4(b)~图 4(e)为 100, 500, 1 000, 1 500 周 TC 时焊点失效图,可以明显看出断裂及其他缺陷行为。通过图 4 可以清晰地观测到在热力耦合冲击条件下焊点的失效大多从 4 个角开始,典型失效模式还是 IMC 的脆性断裂,尤其 IMC 与富 Cu 层或富 Sn 层的接合处。随着耦合冲击力的加大,失效逐渐从离散点状的 Kirkendall 孔^[16]变成纤细且连续的线状;失效位

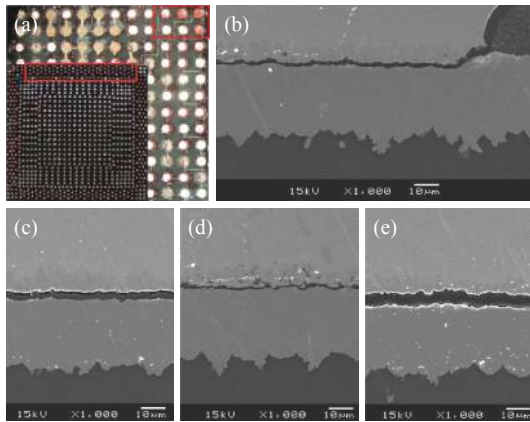


图 4 焊点红油与金相部分失效图

置也逐渐从远到近地靠近富 Cu 层或富 Sn 层;组成成份也从相对单一的 Cu_6Sn_5 变成 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 混杂,甚至后者呈现增长的趋势,耦合冲击严重时甚至出现了焊盘层的鳞状剥离。

图 5 显示了 3 个样品在相同热循环冲击环境下随着跌落冲击强度的增加其耐跌落冲击寿命快速下降,且这种下降趋势接近线性。以实验组 a 为例,可以很直观地观测到在 100 g 的跌落冲击条件下,样品 a 的耐跌落冲击周数为 143 周,900 g 时为 78 周,1 500 g 时为 36 周,而 0 周 TC 时在 100 g 的跌落冲击条件下其耐跌落冲击周数高达 287 次,如图 3(a)所示。通过上述这一点可以推断出样品有固有的耐跌落冲击寿命,且这种寿命会为跌落冲击条件所破坏,因此电子产品在设计与制造时必须进行寿命设计,确保样品必须有足够的耐跌落冲击能力,并模拟现实环境且结合性价比设计出最合理的耐跌落冲击寿命。

在低周 TC 环境下,图 5 的插图(a)显示样品 b 具有相对较高的耐跌落冲击寿命,但是这种跌落冲击能级必须低于 900 g,若跌落冲击能级高于 900 g 时,则样品 b 的耐跌落冲击寿命呈现快速下降的趋势,总体寿命反而低于样品 c,在高周 TC 环境下如图 5 的插图(b)所示。与此同时,样品 1 的耐跌落冲击寿命相对样品 b 和 c 来说一直相对较低。由此我们推断,当电子产品置于低周耦合冲击环境下时,与使用有铅焊料制成焊球的 CSP 器件相比,使

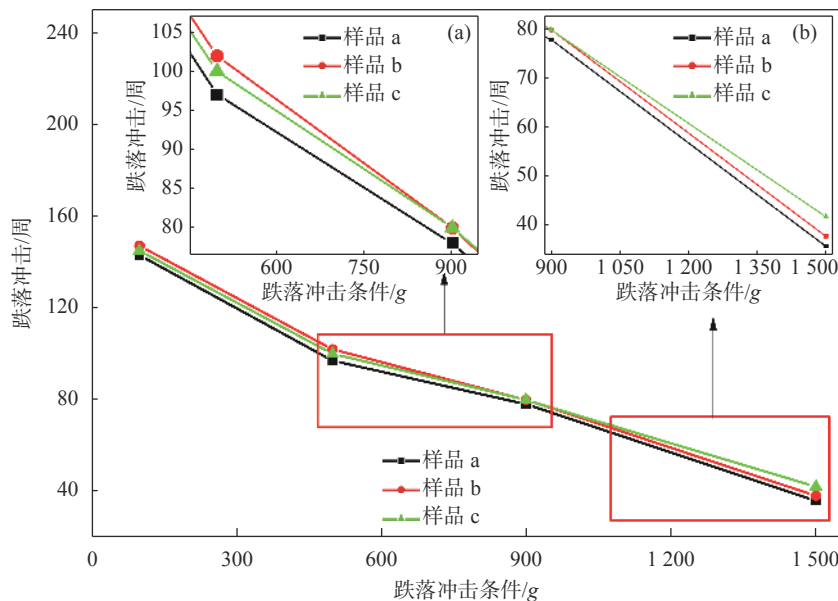


图 5 100 周 TC 时 3 组样品的耐跌落冲击可靠性

用无铅焊料 SAC305 制成焊球的 CSP 器件具有相对更高的使用寿命; 而与 Ni/Au 处理的焊盘相比, 组装板上经过 OSP 处理的焊盘能为 CSP 器件提供更高的耐跌落冲击可靠性寿命。事实上, 在这种耦合冲击环境下, 通过两种处理方式获得的焊盘存在着相同的失效模式^[13, 15], 在低周 TC 阶段二者均为良好的保护层, 但是相对于 OSP 焊盘而言, 高周 TC 将快速破坏其对焊盘的保护作用, 而 Ni 层是一种非常好的耐高温的保护层, Ni₂₆Cu₂₉Sn₄₅ 三元 IMC 层增厚进程非常缓慢, 从而保证了微尺度焊点具有较高的高周耐热力耦合冲击能力。

当电子产品置于热循环冲击较高的使用条件下时, 则一种与之相反的现象将会发生, 如图 6 所示, 无论在哪一个跌落冲击能级, 样品 a 均具有较高的耐跌落冲击能力。样品 b 和样品 c 的耐跌落冲击能力相差无几, 即使在某一个跌落冲击能级二者出现一些略大的差别, 也很难绝对证实哪一种材料更合适, 关于这一点在以往的文献中也得到了证实^[1, 4], 由此我们可以推断出, 经过 Ni/Au 处理的焊盘显然能提供更高周的耐耦合冲击可靠性。当电子产品需要在高周 TC 冲击环境下工作时, 可以针对其应用特点而选用 Ni/Au 处理的焊盘, 这样有利于针对性地提高电子产品的可靠性。

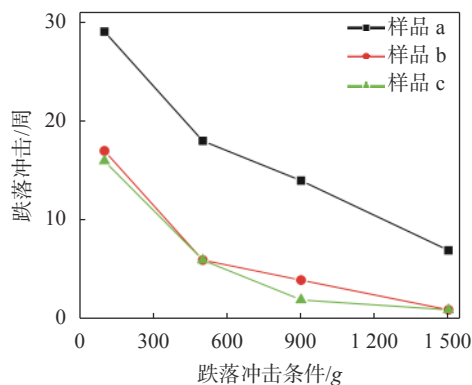


图 6 1500 周 TC 冲击时 3 组样品的耐跌落冲击可靠性

图 7 显示在 900 g 的跌落冲击条件下, 当 3 组样品被分别置于低于 200 周 TC 环境时, 其耐跌落冲击可靠性是 $R_{\text{样品 c}} > R_{\text{样品 b}} > R_{\text{样品 a}}$, 而高于 200 周 TC 环境时, 其耐跌落冲击可靠性正好与之相反。由此我们可以进一步证实当电子产品用于低周 TC 高跌落冲击能级环境时, 使用有铅焊料制成的焊球比无铅焊料制成的焊球更有利于提高 CSP 器件的可靠性, 而用于高周耦合冲击环境时, 选择无

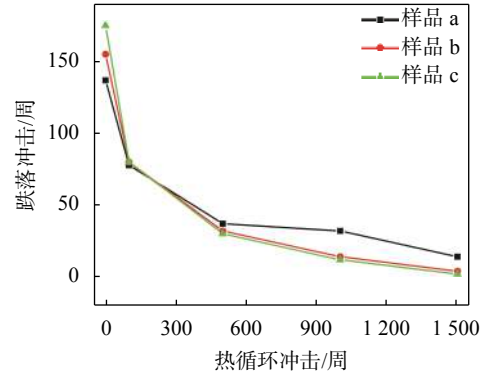


图 7 跌落冲击条件 900 g 时 3 组样品在不同热循环冲击条件下的耐跌落冲击可靠性

铅焊球配合 Ni/Au 处理的焊盘则是更优的选择, 这一点也进一步证实了上文的猜想。

3 结束语

通过对 CSP 器件的微尺度焊点进行热力耦合冲击试验分析, 得出如下结论:

1) 通过对由无铅焊料 SAC305 和有铅焊料 Sn-37Pb 制成焊球的 CSP 器件的微尺度焊点进行热力耦合冲击试验, 可以得出焊点的失效模式是先快后慢, 电子产品的设计应该更多地关注产品的初期失效率, 这样更利于确定质保期。

2) 产品都具有固有的耐耦合冲击能力, 在低周耦合冲击环境下, 无铅焊点具有更高的可靠性, 而在低周 TC 高跌落冲击能级环境下时, 选择有铅焊点则相对更好。此外, 在这种冲击环境下, 选择 OSP 处理的焊盘比 Ni/Au 处理的焊盘更合适。

3) 当产品用于高周耦合冲击环境下时, 选择 Ni/Au 处理的焊盘配合无铅焊球制成的 CSP 器件对提高电子产品的耐耦合冲击可靠性是一种很好的选择。

4) 电子产品在耦合冲击环境下, 随着冲击能级的增大, 其失效位置一般从各个角开始, 由点到线, 再汇合成面, 接合处的断裂风险最高, 裂纹的断裂机制是由韧性断裂转变到脆性断裂, IMC 的组成成份也将逐渐多样化, 最终给电子产品带来失效风险。

参考文献

- [1] 张春红, 张宁, 高尚, 等. 多场耦合时效对微焊点界面组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 165-9.
- [2] 许利伟. 倒装芯片微凸点焊工艺研究及焊点应变有限元仿真 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.