

银含量对跌落条件下无铅焊点疲劳寿命和失效模式的影响

Influence of Silver Content on Fatigue Life and Failure Mechanism of Lead-free Solder Joints Under Drop Conditions

杨金丽¹, 雷永平^{1,2}, 林 健¹, 肖 慧¹

(1 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124;

2 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

YANG Jin-li¹, LEI Yong-ping^{1,2}, LIN Jian¹, XIAO Hui¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2 State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 对 3 种不同 Ag 含量材料 (Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu, Sn-0.3Ag-0.7Cu) 的焊点进行跌落实验, 实验中施加的加速度载荷为峰值 3200g, 脉冲持续时间 1ms 的半正弦波形加速度, 利用电学测试、光学显微镜和扫描电子显微镜确定了失效的焊点并对失效焊点进行分析。结果表明: 3 种材料焊点的失效位置基本都在靠近印刷电路板 (PCB) 侧, BAG 封装最外围 4 个拐角处的焊点最先失效。Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu 焊点的失效模式均为脆性断裂, Sn-0.3Ag-0.7Cu 为韧-脆混合断裂。且随着 Ag 含量的降低, 金属间化合物 (IMC) 的厚度逐渐减小, 焊点的寿命逐渐提高。

关键词: 银含量; 跌落冲击; 失效机理; 疲劳寿命

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.014

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)12-0074-06

Abstract: Drop tests were carried out with three kinds of materials (Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu and Sn-0.3Ag-0.7Cu), respectively. Half-sine acceleration loads was applied in the experiment, the peak value of half sine acceleration and pulse duration were 3200g and 1ms. The failure position of solder joint was identified and analyzed using electrical test, optical microscope, scanning electron microscope. The results show that most of the failures joints for the three kinds of materials locate at the printed circuit board (PCB) side. The solder joints at four outermost corners fail at first. And the failure modes of Sn-3.0Ag-0.5Cu and Sn-1.0Ag-0.5Cu were all brittle fractures, while the Sn-0.3Ag-0.7Cu is brittle-ductile fracture. The thickness of intermetallic compound (IMC) gradually decreases and the life of solder joint enhances with the reduction of Ag content.

Key words: silver content; drop impact; failure mechanism; fatigue life

表面贴装技术 SMT (surface mounted technology) 作为新一代封装技术, 具有成本低、集成度高、电子组件质量轻、易于实现自动化等优点, 是现代电子工业的主要封装形式。由于 SMT 的迅速发展, 使得手机、相机、MP3、笔记本电脑等电子产品日趋掌上化、小型化, 与传统电子产品相比, 这类电子产品更新换代速度快, 寿命周期短, 因此, 由于温度循环导致的失效已不再是主要的失效原因, 它们在存储、运输、使用过程中更容易受到意外的振动、碰撞而引起电子器件失效^[1]。在复杂的动力学环境中焊点失效的主要影响因素是振动和冲击, 尤其在航空航天领域中, 安装在卫星以及火

箭探测器等高尖端设备中的电子设备常常受到来自外界连续的、随机的冲击, 单个冲击大都在 100g 左右, 持续时间为 6ms 以上, 这时的加速度值一般都明显超过了常规电子设备上所要求的许用加速度, 很容易引起器件的损坏, 造成重大损失。因此研究冲击环境对 SMT 焊点可靠性的影响具有十分重要的理论意义和实用价值^[2-4]。

封装件在跌落冲击中最薄弱的部位是焊点, 焊点的可靠性不仅与焊点形状、封装部位等因素有关, 焊点材料也是影响焊点可靠性的一个重要方面。对于无铅 Sn-Ag-Cu 系钎料, 目前国内部分学者进行了可靠性

方面的研究,但是大多数学者都把焦点集中在了对热疲劳的研究上^[5-7],对其抗跌落性能方面的研究还比较少^[8,9]。本工作分析了不同 Ag 含量对无铅 Sn-Ag-Cu 系钎料焊点跌落可靠性的影响,研究焊点的疲劳寿命和失效机理,找出引起这些失效的根本原因,进而对提高 BGA 封装的可靠性提出应对措施。以期能对工程应用有一定的指导意义。

1 实验

1.1 实验材料及方法

采用 Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu 和 Sn-0.3Ag-0.7Cu(以下简称 SAC305, SAC105, SAC0307) 为实验材料,以目前广泛应用的 BGA 封装为研究对象,采用高加速度跌落实验方法,对 BGA 封装在跌落冲击下的可靠性进行了研究。实验所用焊膏为北京工业大学自主研发的 G-SAC305, G-SAC105 和 G-SAC0307 焊膏;BGA 芯片为北京汇晶芯电子技术有限公司定制,内部菊花链如图 1 所示(黑色线表示在电路板上,红色线表示在 BGA 芯片上);BGA 封装的尺寸为 $21\text{mm} \times 21\text{mm}$, 12×12 阵列,焊球直径为 0.5mm ,球间距为 1.0mm ,焊球材质为 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu。为了使实验过程中被测芯片处于同一应力应变水平,以便一次能够统计到更多的样本,电路板设计为圆形,直径为 150mm ,厚度 0.8mm ,每块电路板上对称封装上 4 个 BGA 芯片,用 8 个螺栓将圆形 PCB 板固定在跌落头上,每种焊膏的芯片焊 40 个,以做统计分析。

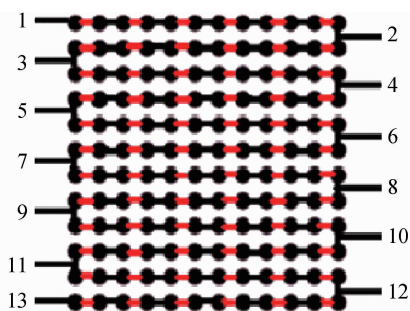


图 1 焊点的菊花链图

Fig. 1 Daisy chains of solder joints

1.2 跌落实验

采用双路跟踪稳压稳流电源作为恒流电源输入;动态信号测试分析仪 DH5923 进行实时电压监测。实验中将 BGA 组装件样品固定在跌落头的 8 个螺柱上,在 PCB 板和跌落头之间预留 12mm 的空隙,以便于在跌落过程中板子可以自由变形。加速度传感器固

定在跌落头上,用于采集每次跌落碰撞产生的实际冲击加速度波形;同时,在 PCB 板上未贴装器件一面芯片最外围焊点处沿径向贴放一个 AF2-120 型半导体电阻应变片,可测得跌落过程 PCB 板上所受应变随时间的关系。测试信号数据和图形分别通过多通道数据采集仪进行采集、储存和显示。根据实验参数的要求(如冲击加速度峰值、脉冲持续时间等)选定碰撞面的材料后,将跌落头上升至离刚性面 60cm 处自由下落,撞击在刚性面上,产生一个峰值 3200g 、脉冲持续时间 1ms 的半正弦波形加速度(图 2)。另外,采用动态信号测试仪对 BGA 芯片的电压进行实时监控,将 BGA 芯片串连成一个回路并通以 0.08A 的恒定电流。在进行跌落实验时,电路板组件在巨大的机械冲击下产生往复弯曲,此时元器件上焊点在承受巨大机械冲击的同时承受电路板往复弯曲产生的拉压应力,导致焊点裂纹的产生,裂纹在焊点中扩展以致完全开路,最终导致焊点失效^[10]。如果一个或多个焊点产生裂纹,则菊花链阻值和压力增大,通过电压的变化来判断焊点内部是否产生裂纹。以芯片断路为失效标准(终值比初始值高出 3 个数量级并保持稳定),记录失效时经历的跌落次数并进行统计分析。

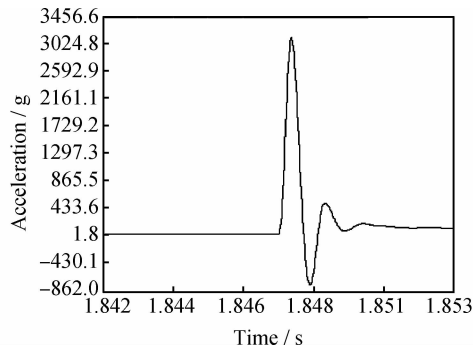


图 2 半正弦波冲击加速度曲线

Fig. 2 Semi-sinusoidal shock acceleration curve

2 结果与分析

2.1 失效判据

对于板级封装部件的失效判据目前尚无统一标准,有些学者以 BGA 焊点的总串联电阻比跌落前增大 10% 时作为样品被判定为失效的依据^[11]。但由于跌落冲击是一个动态过程,在冲击过程中焊点内部产生裂纹使得电阻增大,冲击完成后裂纹有可能恢复到闭合状态,整个过程持续时间非常短暂。这就要求使用的监测设备有非常高的采样频率,即使这样也难免会出现数据漏采和高频失真的现象。本实验中以芯片断路为失效标准。实验中给定的是恒定电流,每个芯

片的初始电压都在 50mV 左右,经过一定次数的跌落以后,芯片电压开始出现不同情况的变化。图 3 为芯片在第 2,5,9 次和 11 次跌落时电压的变化情况。从图 3(a)可以看出,电压波动以后回到初始值,说明冲击过程中焊点产生裂纹,冲击完成后裂纹完全闭合;图 3(b)中电压波动以后稳定值大于初始值,说明冲击过

程中焊点产生裂纹,冲击完成后裂纹不能完全闭合;图 3(c)中电压剧烈波动最后回复不到稳定值,说明冲击过程中焊点产生多个裂纹并不断扩展,冲击完成后裂纹不能完全闭合;图 3(d)中电压剧烈波动以后趋于稳定但远大于初始值,说明冲击过程中有焊点完全断裂,此时判定芯片失效。

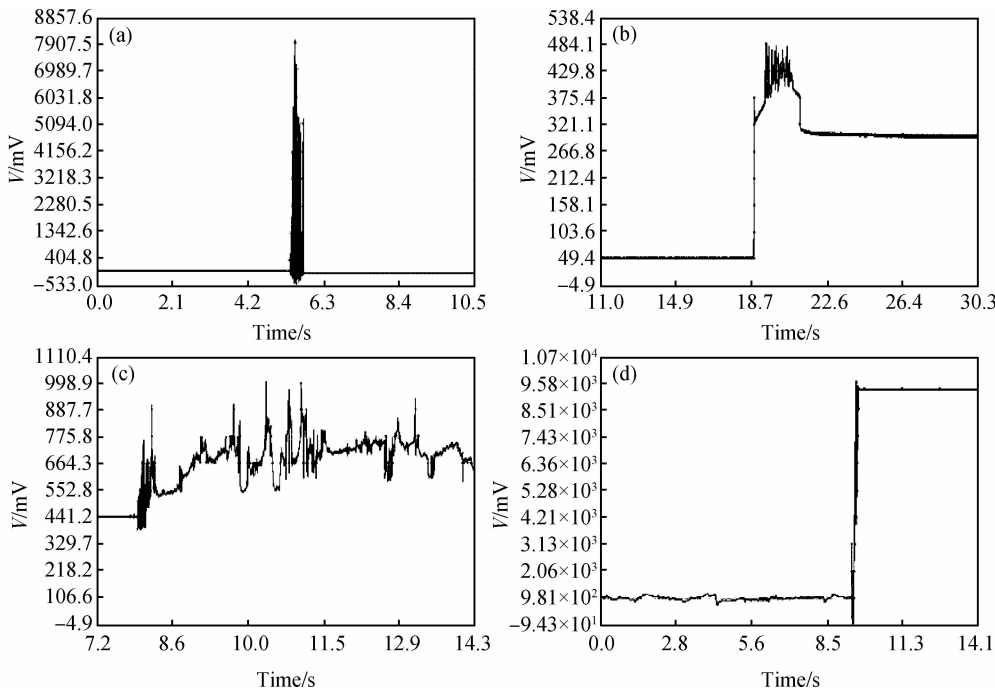


图 3 经历不同的跌落次数时芯片电压的变化 (a)2 次;(b)5 次;(c)9 次;(d)11 次

Fig. 3 Chip voltage changes with different times of drop (a) 2 times;(b) 5 times;(c) 9 times;(d) 11 times

2.2 失效原因分析

3 种不同材料 SAC305, SAC105, SAC0307 焊接的 BGA,失效时经历的平均跌落次数分别为 7.91, 10.51, 14.39 次。可见,随着银含量的降低,焊点的抗跌落性能逐渐提高。3 种材料的失效焊点均与焊点在芯片上所处的位置有一定的关系,以 BGA 芯片的中心位置为参考点,距离中心位置越远焊点越容易失效,即 BGA 芯片最外围的焊点最容易失效。

一般情况下,BGA 焊点失效可分为疲劳失效和过应力失效。疲劳失效是由于焊点在应力作用下产生微裂纹,随着裂纹不断扩延,焊点的性能出现不稳定,最终发生失效;过应力失效是由于焊点受到的应力超出了焊点材料本身的临界力学强度,引起焊点断裂。在跌落实验时,样品在碰撞瞬间受到的巨大冲击力使得 PCB 板发生阻尼震荡,表现为反复的上下弯曲形变。在这个形变过程中,BGA 焊点受到周期性的拉压应力作用,如图 4 所示。在多次的周期性拉压应力作用下,BGA 焊接界面出现疲劳裂纹,并

随着裂纹不断扩展、延伸,导致焊点出现开裂,最终造成整个 BGA 焊接点的疲劳失效^[12]。由于焊点尺寸过小,并且在封装的内侧,焊点所承受的应力应变不易直接测量,而 PCB 板所承受的应力应变跟焊点所承受的应力应变是密切联系的,故实验选择测量 PCB 板上的应变,以此来反应焊点上所受的应变情况,如图 5 所示。

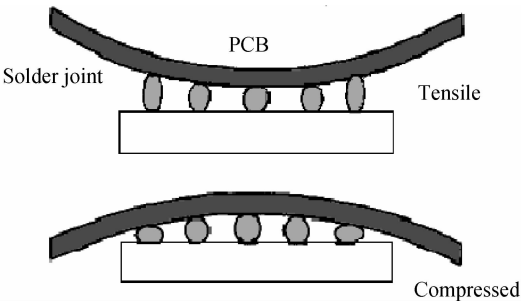


图 4 PCB 弯曲时焊点应力情况

Fig. 4 Stress of solder joints during PCB bending

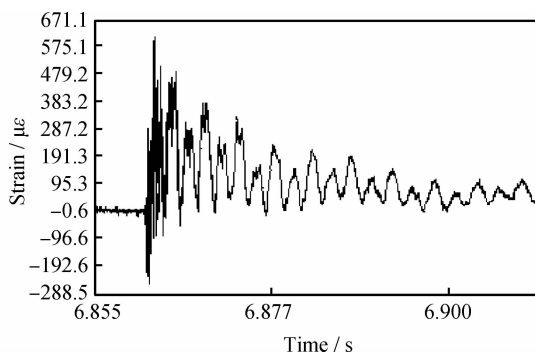


图5 PCB的周向应变

Fig. 5 The circumference strain of PCB

2.3 金相分析

3种不同材料的焊点裂纹金相图如图6所示。

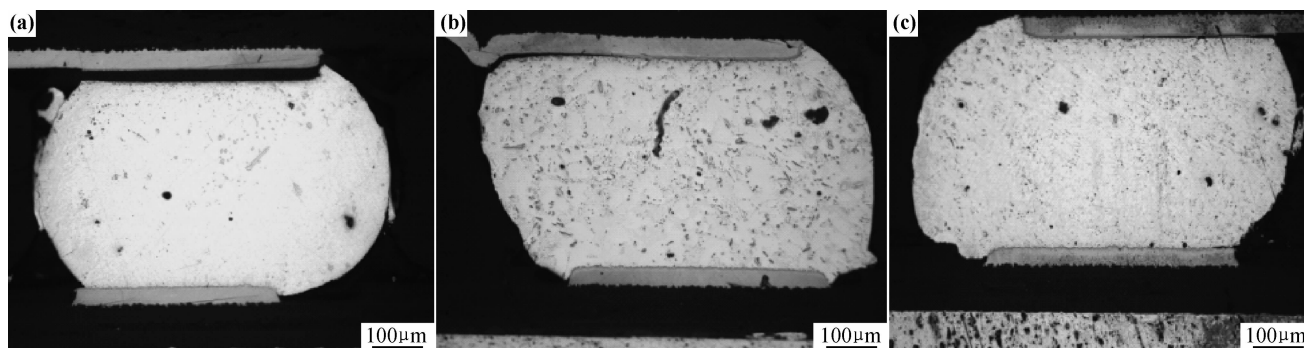


图6 焊点裂纹形貌 (a)SAC305;(b)SAC105;(c)SAC0307

Fig. 6 Crack morphologies of solder joints (a)SAC305;(b)SAC105;(c)SAC0307

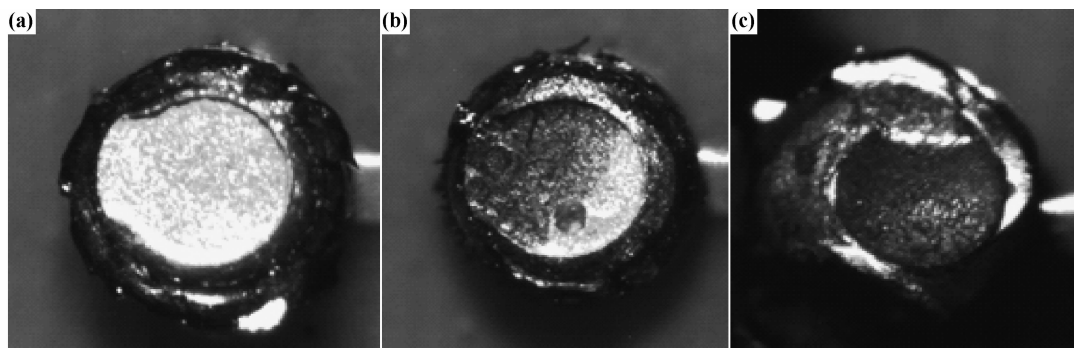


图7 染色后的焊点 (a)没有裂纹;(b)部分裂纹;(c)全部断裂

Fig. 7 Solder joints after dyeing (a)without cracks;(b)with some cracks;(c)all cracks

用CAD软件统计得出SAC305, SAC105和SAC0307被染色的面积分别占总面积的9.84%, 7.12%和5.26%。染色面积越大说明裂纹尺寸越大, 由此也可反映出3种材料的抗跌落性为SAC0307>SAC105>SAC305。

2.5 SEM分析

金属间化合物(IMC)是钎料和母材形成良好冶金结合的标志,但由于IMC本征脆性以及焊料本体的

可知,3种Ag含量板级焊点经过跌落冲击以后,裂纹均产生于PCB侧,且在金属间化合物层萌生并扩展。

2.4 染色实验

为了对BGA芯片上焊点断裂面积进行统计,对跌落破坏后的BGA芯片做染色分析。先将BGA样品放入酒精或异丙醇的超声波清洗机中进行清洗,晾干后浸入装有DYKEM红色染色剂的染色缸中,置于真空环境中保持10min,以去除BGA器件面的空气,然后去除真空浸泡1h,取出后放置在温度为150℃的烘箱中烘干30min,用机械方法拉断BGA所有焊点,并放在体式显微镜下观察,染色后的BGA芯片焊点形貌如图7所示。

物理性质差异,其形态、大小、厚度等都会影响焊点的变形协调性^[13]。机械应力会在焊点相界面、焊盘界面、Kirkendall孔洞和缺陷(如气孔)等弱界面处形成应力集中,进而发展形成微裂纹,使焊点脆化或弱化,疲劳性能下降,最终导致焊点可靠性降低甚至早期断裂^[14-17]。因此,焊点界面的IMC研究一直是电子产品封装可靠性研究的重点之一。IMC的形成及生长不仅跟焊接工艺参数、回流次数、时效时间等因素有

关,还与焊料的成分密切相关。本实验中排除其他因素的干扰,研究不同焊料成分对其的影响。图 8 为 3 种不同材料焊点的剖面 SEM 图。所用 PCB 表面镀层

为 Ni/Au,经 EDX 分析,回流焊后形成的金属间化合物中 Cu, Ni, Sn 的原子百分比为 46.57 : 7.40 : 46.03,故该金属间化合物为 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 。

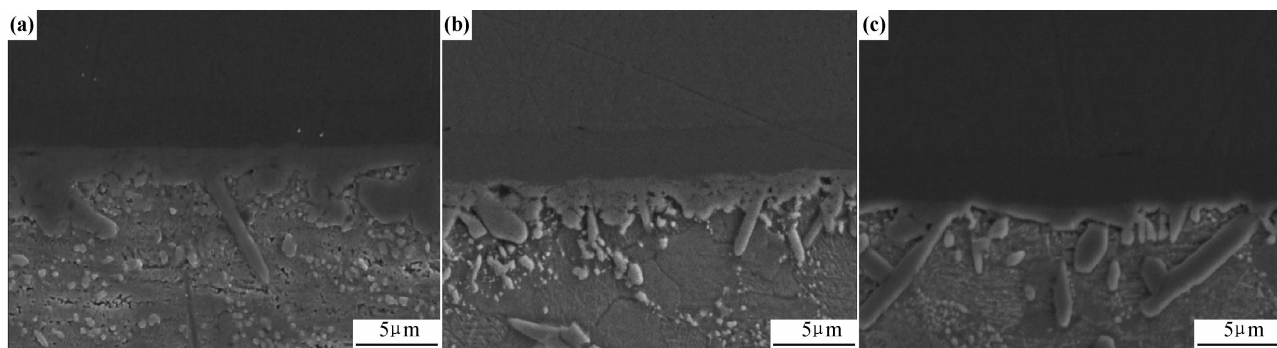


图 8 IMC 的 SEM 显微组织照片 (a)SAC305; (b)SAC105; (c)SAC0307

Fig. 8 SEM micrographs of IMC (a)SAC305; (b)SAC105; (c)SAC0307

经计算,3 种材料 SAC305, SAC105, SAC0307 焊点的金属间化合物厚度分别为 3.0, 2.8, 2.1 μm 。可以看出,3 种 SnAgCu 无铅焊料焊点界面 IMC 的厚度特点: SAC305 > SAC105 > SAC0307, Ag 含量最低的材料 SAC0307, 其金属间化合物的厚度也最小, 而 SAC305 和 SAC105 这两种材料的金属间化合物厚度区别不是很明显。

分析认为: ΔT (实际焊接温度与液相线温度之间的温度差) 的不同可能是其中一个原因: 从 Sn-Ag 相图中可以发现, Sn 的熔点约为 232 $^{\circ}\text{C}$, 而 SAC305 熔点约为 221 $^{\circ}\text{C}$, 相同的钎焊温度下, 高 Ag 含量的钎料比低 Ag 含量的钎料 ΔT 大很多, ΔT 越大, 液态金属冷却凝固时的过冷度越大, 这就可以为 IMC 的形成提供更多的热力学动力, 这可能是 SAC305 接头的界面 IMC 比 SAC0307 厚的一个原因。但 IMC 的厚度并不是随着 Ag 含量的增加而一直上升的, 这是由于 Sn 和合金化元素 Ag 之间具有很大的亲和力, 当在 Sn 基体中加入合金化元素 Ag 时, 导致 Sn 的活度降低, 所以 Ag 元素的添加降低了界面反应速率, 使生成的界面 IMC 厚度减小^[18]。虽然在 IMC 厚度上, SAC305 和 SAC105 区别不是很明显, 但是抗振动疲劳寿命却有显著差异, 可见除了金属间化合物厚度的区别外, 焊点的抗振动疲劳寿命还受其他方面因素的影响。比如 IMC 的形态, 可以看出, SAC305 的 IMC 呈大块状的结构; SAC105 的 IMC 呈大颗粒状, 中间有微小空隙和裂纹; 而 SAC0307 的 IMC 呈薄片状, 但是有长棒状突起伸向钎料基体内部。由于 IMC 的硬脆性, SAC305 中的大块状 IMC 与钎料基体的变形协调性较差, 在受到外界冲击的时候, 加载在焊点上的应力在短时间内来不及释放, 在 IMC 处形成应力集中, 超出焊点所能承受的最大

强度以后, 造成焊点的脆性断裂; 在 SAC105 材料焊点的 IMC 中, 少量的空隙和微裂纹反而在一定程度上降低了应力集中并且阻挡了裂纹的扩展; SAC0307 中的 IMC 较薄, 与焊料基体的变形协调性较好, 伸入焊料基体内部的长棒状的 IMC 由于其形态细长的原因, 受到外力作用的时候很容易发生折断, 消耗了外力又不会很大程度上弱化界面, 这可能是低银焊料的焊点比高银焊料的焊点抗跌落可靠性高的另一个原因。

不同焊料的接头断口形貌如图 9 所示。可以看出, SAC305 的 IMC 呈大块状分布, 断裂全部发生在 IMC/IMC 层; SAC105 的 IMC 颗粒已不像 SAC305 那样粗大, 断面露出了很多钎料基体, 在 IMC/solder 界面的断裂和 IMC/IMC 界面的断裂并存; 而在 SAC0307 的断口上可见残留的焊料周围分布着大量的韧窝, 在焊料基体的晶界处有很多细小的白色颗粒, 这些白色的颗粒就是 Ag_3Sn 粒子。 Ag_3Sn 粒子的形成有利于降低 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ IMC 颗粒的表面能。 Ag_3Sn 粒子的吸附抑制了界面 IMC 的生长, 这就使得 SAC0307 的 IMC 层厚度小于其他两种。逐渐趋向于韧性断裂模式也使得它的跌落寿命明显高于 SAC305 和 SAC105。

3 结论

(1) 随着 Ag 含量的降低, 焊点的抗跌落寿命逐渐提高; BGA 焊点在芯片中的位置对其失效寿命有很大影响, 最外围的焊点最容易失效。

(2) SAC305 和 SAC105 的焊点断裂模式为脆性断裂, SAC0307 为韧-脆混合断裂。

(3) 3 种 Sn-Ag-Cu 无铅焊料焊点界面 IMC 的厚度特点: SAC305 > SAC105 > SAC0307。

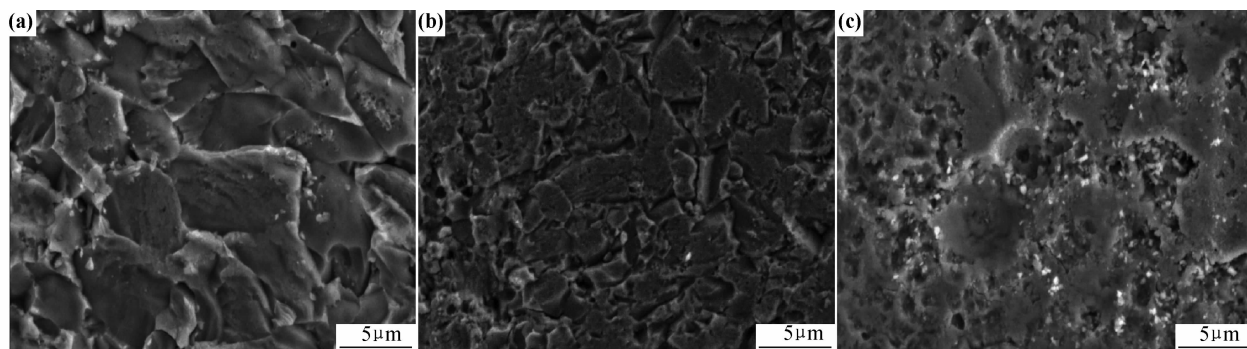


图9 不同焊料的接头断口形貌 (a)SAC305;(b)SAC105;(c)SAC0307

Fig. 9 Morphologies of fracture surface for different joints (a)SAC305;(b)SAC105;(c)SAC0307

(4)在低 Ag 钎料的 IMC 前端有许多纳米级 Ag_3Sn 粒子。 Ag_3Sn 粒子的形成有利于降低 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ IMC 颗粒的表面能,抑制界面 IMC 的生长。

参考文献

- [1] 尹立孟,位松,李望云. 电子封装用低银含量无铅钎料的研究和应用进展[J]. 焊接技术,2011,40(2):1-5.
YIN L M, WEI S, LI W Y. Research and application of low silver content lead-free solder in electronic packaging[J]. Welding Technology,2011,40(2):1-5.
- [2] 郭强. 振动冲击条件下 SMT 焊点疲劳寿命与可靠性的理论与实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.
- [3] WU J, SONG G S, YEH C P, et al. Drop impact simulation and test validation of telecommunication products[A]. Inter Society Conference on Thermal Phenomena[C]. Piscataway: IEEE,1998. 330-336.
- [4] LIM C T, LOW Y J. Investigating the drop impact of portable electronic products[A]. Electronic Components and Technology Conference[C]. Piscataway, USA: IEEE,2002. 1270-1274.
- [5] LEE J G, SUBRAMANIAN K N. Effect of dwell times on thermomechanical fatigue behavior of Sn-Ag based solder joints[J]. Journal of Electronic Packaging,2003,32(6):523-530.
- [6] SHANGGUAN D K. Analysis of crack growth in solder joints[J]. Soldering & Surface Mount Technology,1999,11(3):27-32.
- [7] TU P L, CHAN Y C, LAI J K L. Effect of intermetallic compounds on the thermal fatigue of surface mount solder joints[J]. IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society,1997,20(1):87-93.
- [8] WU J, SONG G S. Drop impact simulation and test validation of telecommunication products [A]. Inter Society Conference on Thermal Phenomena[C]. Piscataway, USA: IEEE,1998. 330-336.
- [9] LIM C T, LOW Y J. Investigating the drop impact of portable electronic products[A]. Electronic Components and Technology Conference[C]. Piscataway, USA: IEEE,2002. 1270-1274.
- [10] 周新. 板级无铅焊点跌落冲击载荷下可靠性分析[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [11] 瞿欣,姜浩煊. BGA 焊点在板级跌落实验中的疲劳寿命估计[J].

封装测试技术,2006,31(6):2-5.

- QU X, LOU H H. Fatigue life assessment of solder joints of BGA component in board level drop test[J]. Package & Test Technology,2006,31(6):2-5.
- [12] 王文. SMT 无铅焊点在随机振动载荷下的可靠性分析[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [13] 李晓延. 金属间化合物对 SnAgCu/Cu 界面破坏行为的影响[J]. 机械强度,2005,27(5):666-671.
LI X Y. Influence of IMC on the interface failure of tin-silver-copper solder joints[J]. Mechanical Strength,2005,27(5):666-671.
- [14] DUAN N, SCHEER J, BIELEN J, et al. The influence of Sn-Cu-Ni(Au) and Sn-Au intermetallic compounds on the solder joint reliability of flip chips on low temperature co-fired ceramic substrates[J]. Microelectronics Reliability,2003,43(8):13-17.
- [15] ZENG K, TU K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology[J]. Materials Science and Technology,2002,38(2):55-101.
- [16] FOLEY J C, GICKLER A, LEPREVOST F H, et al. Analysis of ring and plug shear strengths for comparison of lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials,2000,29(10):1258-1263.
- [17] SALAM B, EKERE N N, RAJKUMAR D. Study of the interface microstructure of Sn-Ag-Cu lead-free solders and the effect of solder volume on intermetallic layer formation[A]. 2001 Electronic Components and Technology Conference[C]. Orlando, USA: Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc,2001. 471-477.
- [18] 何大鹏. 合金元素对二元 Sn 基钎料钎焊界面 IMC 的影响[D]. 大连:大连理工大学,2005.

基金项目:北京市自然科学基金(3102002)和重点项目基金(KZ20110005002)资助;现代焊接生产技术国家重点实验室课题基金资助项目(51275006)

收稿日期:2012-09-05;**修订日期:**2013-04-11

作者简介:杨金丽(1988-),女,硕士研究生,从事电子封装连接材料及其可靠性评价方面研究工作,联系地址:江苏省无锡市滨湖区山水东路188号江南计算技术研究所(214000),E-mail: fanyang131413@163.com