

引用格式:杨晓军,李晓光,贺定勇,等. 环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点热稳定性[J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(2): 140-147.
YANG X J, LI X G, HE D Y, et al. Thermal stability of solder joints of epoxy-based Sn-Bi solder paste[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(2): 140-147. (in Chinese)

环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点热稳定性

杨晓军, 李晓光, 贺定勇, 马立民

(北京工业大学材料科学与工程学院, 焊接与表面工程技术研究所, 北京 100124)

摘要:为探究环氧树脂壳层对 Sn-Bi 焊点的热稳定性的影响,选取了 130 ~ 170 °C 的温度区间,对自制环氧基 Sn-Bi 焊膏和商用 Sn-Bi 焊膏(不含可固化树脂)形成的焊点分别进行了热循环试验。结果表明,1 000 次热循环后,环氧基 Sn-Bi 焊膏形成的焊点,其表面的环氧树脂壳层依然完整保留,而焊点与铜基板的界面金属间化合物的厚度也明显低于商用 Sn-Bi 焊膏。1 000 次热循环后,环氧基 Sn-Bi 焊膏形成的焊点的电导率由 1.90×10^6 S/m 降为 7.96×10^5 S/m,剪切强度由 145.7 MPa 降为 123.7 MPa;商用 Sn-Bi 焊膏形成的焊点的电导率由 1.94×10^6 S/m 降为 4.95×10^5 S/m,剪切强度由 116.1 MPa 降为 97.3 MPa。因此,对比商用 Sn-Bi 焊膏,环氧基 Sn-Bi 焊膏形成的焊点表面的环氧树脂壳层对于提高焊点的剪切强度和热稳定性是有利的,且一定程度上抑制了金属间化合物的生长。

关键词:无铅焊膏;环氧树脂;热稳定性;金属间化合物;电导率;剪切强度

中图分类号: TG 42

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2025)02-0140-08

doi: 10.11936/bjtxb2023030001

Thermal Stability of Solder Joints of Epoxy-based Sn-Bi Solder Paste

YANG Xiaojun, LI Xiaoguang, HE Dingyong, MA Limin

(Institute of Welding and Surface Engineering Technology, College of Materials Science and Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate the effect of the epoxy resin shell on the thermal stability of Sn-Bi solder joints, the temperature range of 130 – 170 °C was set and thermal cycling tests were carried out on solder joints formed by self-made epoxy-based Sn-Bi solder paste and commercial Sn-Bi solder paste (without curable resin). Results show that after 1 000 thermal cycles, the epoxy resin shell on the surface of the solder joints formed by the epoxy-based Sn-Bi paste remains intact and the thickness of the intermetallic compound between the solder joint and the copper substrate is also significantly lower than that of the commercial Sn-Bi solder pastes. The electrical conductivity of the solder joint formed by the epoxy-based Sn-Bi paste decreases from 1.90×10^6 S/m to 7.96×10^5 S/m after 1 000 thermal cycles, and the shear strength decreases from 145.7 MPa to 123.7 MPa. However, the electrical conductivity of the solder joint formed by the commercial Sn-Bi paste decreases from 1.94×10^6 S/m to 4.95×10^5 S/m, and the shear strength decreases from 116.1 MPa to 97.3 MPa. Therefore, compared with commercial Sn-Bi solder paste, the epoxy resin shell on the surface of the solder joint formed by epoxy-based Sn-Bi solder paste effectively improves the shear strength and thermal stability of the solder joint, and to some extent hinders the growth of intermetallic compounds.

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52205324); 国家自然科学基金资助项目(51301007)

作者简介: 杨晓军(1971—), 女, 副教授, 主要从事电子材料方面的研究, E-mail: yangxj@bjut.edu.cn

Key words: lead-free solder paste; epoxy resin; thermal stability; intermetallic compounds; electrical conductivity; shear strength

电子封装是将电子产品中各个功能单元连接起来的一种技术,是连接芯片内外部电路的桥梁,是实现芯片功率输入、输出与外界连接的途径。从 20 世纪 70 年代至 21 世纪初,微电子封装发展迅速^[1-2]。在先进电子封装技术的发展中,电子器件越来越小型化,导致引脚更多、间距更短、接头更小,对接头的可靠性要求越来越高,电子设备的可靠性主要取决于接头的可靠性^[3-4]。此外,当焊点尺寸下降时,界面金属间化合物的生长速度更为迅速^[5],对受脆性 IMC 影响的焊点的跌落、剪切、抗热循环等性能均有不利影响^[6-7]。

Sn-58Bi 合金钎料因具有低熔点、低成本、良好的焊接润湿性和抗拉强度等优势^[8],适用于电子行业中热敏组件的低温连接。但 Sn-58Bi 合金中的 Bi 相是脆性相^[9],共晶 Sn-Bi 钎料接头在发生相偏析之后,接头的力学性能会大幅降低,导致焊点的力学强度降低^[10-11],使其应用受到限制。相较于传统的通过合金化以提高焊点力学性能的方法,以树脂增强 Sn-Bi 合金接头强度的方法成本更低,对焊点力学性能的提升效果更为显著^[12]。环氧基 Sn-Bi 焊膏由可固化的助焊剂和 Sn-Bi 焊料粉混合而成。在焊接过程中,可固化助焊剂除了具有传统助焊剂的功能之外,还可在焊点外围形成固化的环氧树脂壳,可有效提高焊点的剪切强度和热稳定性。同时还可以将焊后残留物包裹,从而抑制传统助焊剂的焊后残留物对焊点的不利影响,隔离空气中的氧气和水分,保护合金焊点免受环境影响,提高焊点的热稳定性。

Myung 等^[13-16]对比研究了不同表面和不同环境条件下环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点机械性能,结果表明,环氧基 Sn-58Bi 焊膏的接头剪切强度高于 Sn-58Bi 焊膏的接头剪切强度,并且环氧树脂的存在不会影响焊点的电气性能。跌落测试表明,与 Sn-58Bi 焊膏接头相比,环氧基 Sn-58Bi 焊膏接头可以承受更高次数的跌落而不失效。老化试验发现,在老化过程中,接头剪切强度随着老化时间的增加而降低,但环氧基 Sn-58Bi 焊膏的焊点接头的剪切强度高于 Sn-58Bi 焊膏约 2.4 倍。Liu 等^[17]研究了环氧树脂含量对 Sn-58Bi 焊膏的润湿性、焊点的微观结构和剪切强度的影响,结果表明,含适量环氧树脂的 Sn-58Bi 焊膏具有更好的润湿性和更高的接头剪切

强度。

电子封装中电子设备的热失效模式主要有 2 种:一种是长期服役引起的组件故障,另一种是由热循环引起的焊点疲劳断裂,焊点失效是器件失效的主要原因之一^[18-19]。焊点在服役条件下,温度始终处于周期性变化中,容易导致疲劳蠕变,进而引起老化开裂,而温度循环导致的疲劳失效本质上是材料的热膨胀系数失配及热迁移等引起的^[20-22]。

笔者在前期已对环氧基 Sn-Bi 焊膏的制备方法和焊接工艺条件的优化,以及焊点的微观结构等进行了研究^[23],但对于焊点的热稳定性及固化环氧树脂壳层的影响作用未进行系统评价。考虑到 Sn-58Bi 合金钎料的熔点(138 °C)较低,其焊点在服役中的温度变化极有可能超出熔点,即使是瞬间的熔化也有可能对焊点的稳定性造成严重影响。因此,选取了 130 ~ 170 °C 的温度区间,进行热循环试验。为考察环氧树脂壳层对 Sn-Bi 焊点的热稳定性的影响,商用 Sn-Bi 焊膏(不含可固化树脂)作为对照组,也进行了相同条件下的热循环试验。跟踪测试样品的电导率、剪切强度和界面金属间化合物随热循环周次的变化,对环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点热稳定性及其影响因素进行分析讨论。

1 试验

1.1 试验材料

Sn-58Bi 焊料粉(平均直径 48 ~ 60 μm)购于河北华钴合金焊接材料有限公司;商用 Sn-58Bi 焊膏购于东莞惠邦电子材料有限公司;环氧树脂 E51 购于南通星辰合成材料有限公司;环氧固化剂为自制潜伏性固化剂;有机酸及其他助剂购于中国国药化学试剂有限公司。

1.2 试验过程

1.2.1 配制环氧基 Sn-Bi 焊膏

参照前期工作^[23],将环氧树脂(epoxy resin, EP)、自制固化剂、催化剂和有机酸等按比例混合,配制可固化助焊剂。然后,将可固化助焊剂和 Sn-Bi 焊料粉按 14:86 的质量比混合,得到环氧基 Sn-Bi 焊膏。

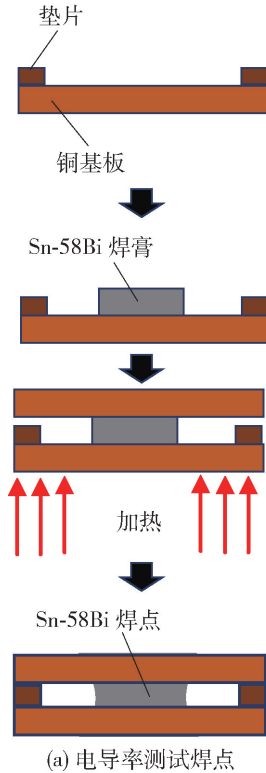
因商用 Sn-Bi 焊膏的配方未知,为排除焊膏中助剂成分不同对实验结果的影响,配制了以等量溶剂替代环氧树脂,其他成分与环氧基 Sn-Bi 焊膏相

同的自制无环氧 Sn-Bi 焊膏,作为对照样品。

1.2.2 热循环试验所用样品的制备

按照图 1 所示,分别在铜基板上形成 2 种焊点,焊点 1(a)用于电导率测试,焊点 1(b)用于剪切强度测试。

如图 1(a)所示为 2 片铜板之间的焊点形成示意图,在下层铜板的边缘处放置垫片,用内径为



2 mm 的圆孔模板将焊膏印刷到铜板表面,然后放置上层铜板,按照预定的焊接工艺曲线加热-冷却,得到焊点,用于焊点的电导率测试。

如图 1(b)所示为铜板表面的焊点形成示意图,用内径为 2 mm 的圆孔模板将焊膏印刷到铜板表面,按照预定的焊接工艺曲线加热-冷却,得到焊点,用于剪切强度测试。

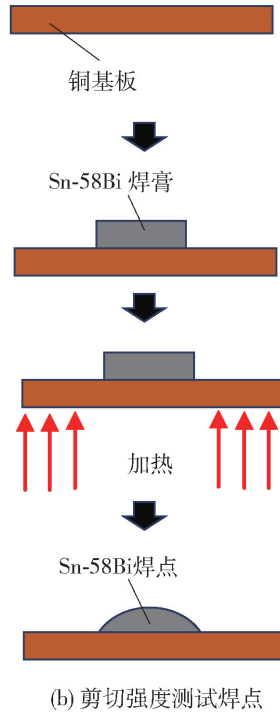


图 1 焊点成形示意

Fig. 1 Schematic diagrams of formation of solder joints

1.2.3 热循环试验

采用微电脑加热平台,对 2 种焊点样品进行热循环试验。热循环温度-时间曲线如图 2 所示,起始温度为 130 ℃,加热至 170 ℃,保温 30 s,再降温到 130 ℃,保温 30 s,升温/降温速率为 10 K/min,此为一个循环。分别对热循环周次为 0、250、500、750 和 1 000 次的样品进行分析和表征。

分别采用红外测温仪和热电偶对焊点的表面温度和内部温度(即钎料部分)进行了测量。实测的焊点表面温度比设定温度低 10~25 ℃,钎料内部温度比设定温度低 5~15 ℃,有/无环氧层的焊点的表面温度和内部温度差别不明显。

1.2.4 分析与表征

1) 电导率测量

采用微电阻测量仪测量焊点的电导率,样品为

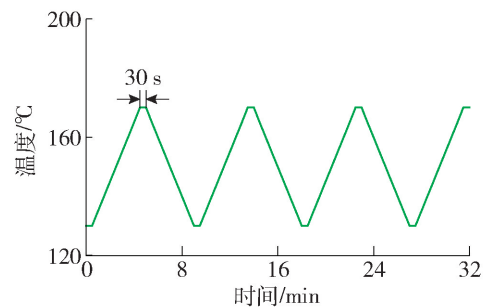


图 2 热循环试验曲线

Fig. 2 Setting curve of thermal cycle test

图 1(a)所示的连接 2 个铜板的焊点样品。将样品夹持于微电阻测量仪的测量模具之间,读取电阻值。以 2 个铜板为电极,焊点的横截面积为 A , 2 个电极间距为 L , 可由测得的电阻 R 计算出样品的电导率

$$\sigma = L/(RA) \quad (1)$$

式中: σ 为电导率; R 为电阻; A 为横截面积; L 为两极间距。

2) 剪切强度测试

按照图3所示,采用推拉力测试仪(Dage 4000, Nordson, UK)测试焊点与铜板之间的剪切力,样品为图1(b)所示的铜板表面的焊点样品。

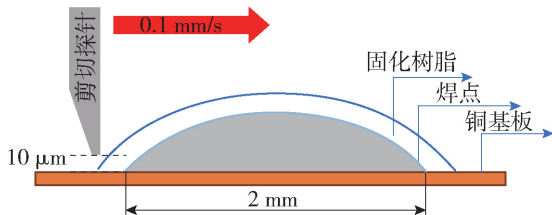


图3 剪切测试示意

Fig. 3 Schematic diagram of shear test

调整测试仪的探针尖端,使其与铜基板的间距为 $10\ \mu\text{m}$ 。以 $0.1\ \text{mm/s}$ 的速度水平移动探针,施加推力于焊点,记录最大推力值,由此计算焊点的剪切强度。

3) 热分析

分别采用 TGA (STA 449 F3, NETZSCH, Germany) 和 DSC (200PC, NETZSCH, Germany) 对固化环氧树脂壳层的耐热性进行表征,测试条件为:氩气保护,加热速率为 $20\ \text{K/min}$ 。

4) 微观结构分析

采用金相显微镜(BM51, Olympus Corporation, Japan)和扫描电子显微镜(GeminiSEM 300, Zeiss, Germany)对焊点的微观结构进行观察。

2 结果和讨论

为便于讨论,将环氧基 Sn-Bi 焊膏形成的焊点用 Sn-Bi/EP 表示,而商用 Sn-Bi 焊膏(不含可固化树脂)形成的焊点用 Sn-Bi/N-EP 表示。与传统 Sn-Bi 焊膏相比,环氧基 Sn-Bi 焊膏中的可固化树脂在焊点外围可形成固化的树脂壳,而传统 Sn-Bi 焊膏的焊点表面是焊后残留物。

因商用 Sn-Bi 焊膏的配方未知,为排除焊膏中助剂成分不同对试验结果的影响,对比了自制无环氧 Sn-Bi 焊膏与商用 Sn-Bi 焊膏的润湿性和焊点的剪切强度。自制无环氧 Sn-58Bi 焊膏和商用 Sn-58Bi 焊膏的润湿角分别为 27.10° 、 27.70° ,焊点的剪切强度分别为 113 、 $116\ \text{MPa}$,差别不明显,可忽略商用 Sn-Bi 焊膏的助剂成分对热循环试验结果的影响。

2.1 焊点的微观结构分析

图4为 Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点截面的金相显微镜照片,焊点结构对称、形态饱满,表明2种焊膏的润湿性都较好。

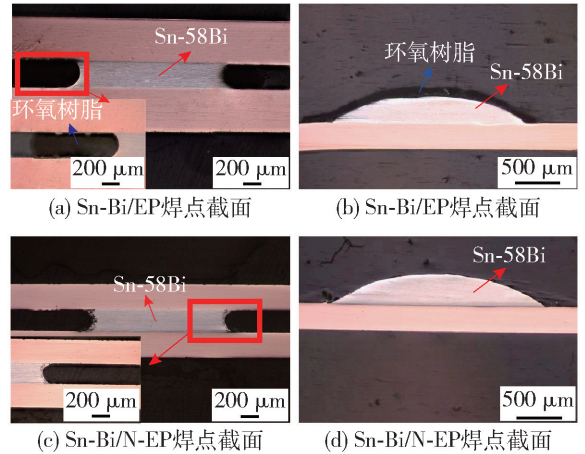


图4 焊点截面的金相显微镜照片

Fig. 4 Metallographic photos of cross-sections of solder joints

由图4(a)可见,环氧树脂在合金焊点的外围固化,在焊点与上层和下层铜板的界面没有观察到树脂残留物。由图4(b)可见,在 Sn-Bi/EP 焊点表面有一层固化的环氧树脂壳层,壳层将合金焊点覆盖,边缘与铜板连接,铜板表面的润湿角为 21.32° 。由图4(c)可见,Sn-Bi/N-EP 焊点的合金焊点部分与 Sn-Bi/EP 相当,但焊点的外表面有颗粒状残留物,无致密外壳。由图4(d)可见,Sn-Bi/N-EP 焊点与 Sn-Bi/EP 相比,合金表面少了一层固化的环氧树脂壳层,铜板表面的润湿角为 27.70° ,略大于 Sn-Bi/EP。

在热循环试验过程中,跟踪观察焊点外观,可以发现,Sn-Bi/EP 焊点表面的环氧树脂固化物由无色透明逐渐转变为黄色半透明,这是胺类固化的环氧树脂的常见现象,即长期受热后树脂会发生黄化。图5(a)所示为热循环试验前(即为0次)的焊点宏观照片,焊点表面是无色透明的固化环氧树脂。而在热循环1000次后,焊点表面的环氧树脂固化物发生了黄化,但壳层仍保留完整形态,如图5(b)所示。

从 Sn-Bi/EP 焊点表面的固化树脂层取样,包括热循环试验前(即0次)和热循环1000次后的样品,分别进行了 DSC 和 TGA 分析,得到图6所示的 DSC 和 TGA 曲线。由图6(a)可知,热循环试验前取样的环氧树脂固化物,在 $90\sim 210\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围

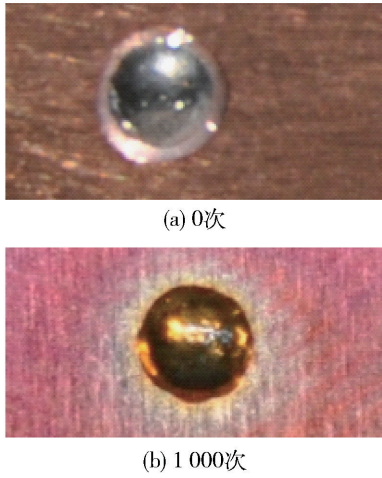


图5 Sn-Bi/EP焊点热循环前后照片

Fig. 5 Photos of Sn-Bi/EP solder joint before and after thermal cycles

内,随温度升高无明显热效应,热稳定性较好。在热循环1000次后,对比热循环试验前,热稳定性没有变化。由图6(b)可知,在200℃以下,样品的质量损失率接近于0,即没有发生热分解等影响结构稳定的过程,即使热循环1000次后,焊点表面的固化树脂层的热稳定性仍较好。

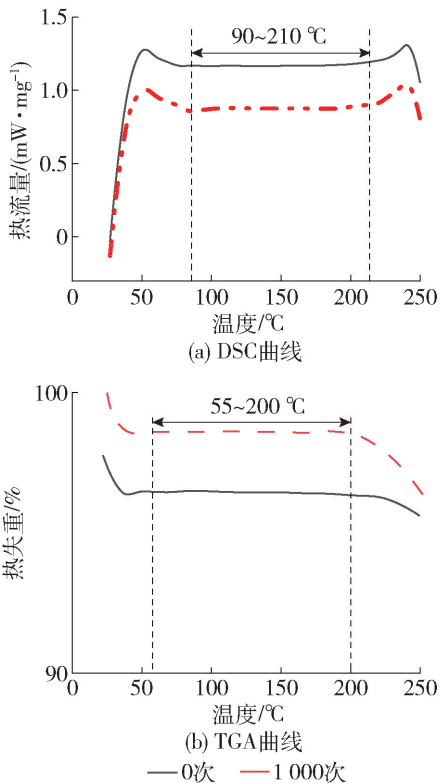


图6 Sn-Bi/EP焊点表面的环氧树脂固化层的热分析曲线
Fig. 6 Thermal analysis curves of the cured epoxy layer on the surface of Sn-Bi/EP solder joints

因此,130~170℃的热循环试验中,Sn-Bi/EP焊点表面的环氧树脂固化层本身在热循环过程中是稳定的,始终在合金焊点表面完整覆盖。与Sn-Bi/N-EP焊点相比,Sn-Bi/EP焊点表面多了一层耐热保护壳。在130~170℃的热循环温度区间,合金焊点会发生熔化,但环氧树脂固化壳层的存在可以抑制焊点短时熔化后可能出现的位置偏移,即对焊点有保护作用。

2.2 焊点的电导率随热循环周次的变化

跟踪测量Sn-Bi/EP和Sn-Bi/N-EP焊点样品的电导率,可推断热循环试验过程中焊接接头的可靠性,尤其是在热循环过程中焊料合金经历了短时熔化过程。以焊点样品的电导率为纵坐标,热循环周次为横坐标,得到了焊点的电导率随热循环周次的变化曲线,如图7所示。

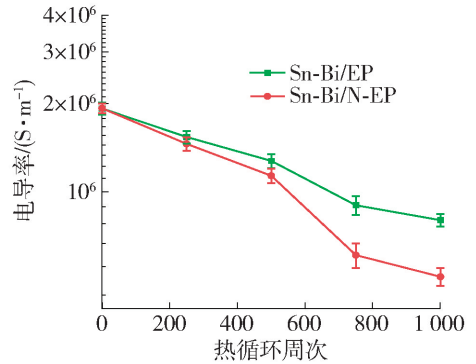


图7 焊点的电导率与热循环周次的关系曲线
Fig. 7 Electrical conductivity of solder joints vs thermal cycles

分析图7的曲线可知,Sn-Bi/EP和Sn-Bi/N-EP焊点样品在热循环周次从0到1000次,电导率发生了微小变化。在热循环试验开始时,Sn-Bi/EP和Sn-Bi/N-EP焊点的电导率非常接近,均为 1.9×10^6 S/m。但随着热循环周次的增加,二者的差距逐渐增大。相对来说,Sn-Bi/EP的电导率变化更小。热循环1000周次后,Sn-Bi/EP和Sn-Bi/N-EP焊点样品的电导率分别为 7.96×10^5 、 4.95×10^5 S/m。

热循环试验过程中焊点样品基本处于水平,而在实际应用中,很难保持始终水平的状态,因而Sn-Bi/EP焊点的优势将更明显。换句话说,环氧树脂固化层可有效阻止极端条件下熔化焊点的位置偏移,提高焊点的可靠性。

由此可知,Sn-Bi/EP焊点外围的环氧树脂固化物不影响焊点与铜板的电气连接效果,电导率初始值与传统焊膏相当。随着热循环周次的增加,电导

率降低趋势比 Sn-Bi/N-EP 焊点更小, 即 Sn-Bi/EP 焊点更稳定。

2.3 焊点的剪切强度随热循环周次的变化

分别测试热循环周次为 0、250、500、750、1 000 次的 Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点样品的剪切强度, 测试方法如 1.2.4 中所描述。以焊点的剪切强度为纵坐标, 热循环周次为横坐标, 得到了焊点的剪切强度随热循环周次的变化曲线, 如图 8 所示。

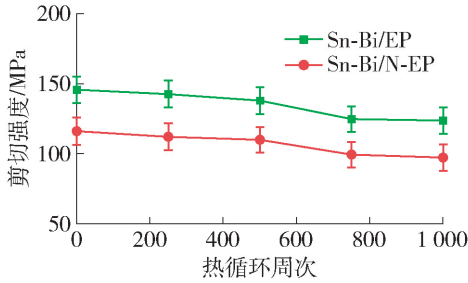


图 8 焊点的剪切强度与热循环周次的关系曲线

Fig. 8 Shear strength of solder joints vs thermal cycles

分析图 8 的曲线可知, 随着热循环周次的增加, Sn-Bi/EP 焊点样品的剪切强度由初始值 145.7 MPa 降为 123.7 MPa, 即热循环 1 000 次后剪切强度降低了 15%。而 Sn-Bi/N-EP 焊点样品的剪切强度由初始值 116.1 MPa 降为 97.3 MPa, 即热循环 1 000 次后剪切强度降低了 16%。与 Sn-Bi/N-EP 焊点相比, Sn-Bi/EP 焊点表面多了一层环氧树脂固化层, 使焊点的剪切强度提高了约 25%。在热循环过程中, 因环氧树脂固化层本身是稳定的, 其对焊点剪切强度的提高作用始终存在, 因而 Sn-Bi/EP 焊点的剪切强度始终比 Sn-Bi/N-EP 焊点高 25% 左右。

由此可知, Sn-Bi/EP 焊点外围的环氧树脂固化物可明显提高焊点与铜板的连接强度, 且在热循环试验中, 尽管焊点剪切强度随热循环周次的增加而略有降低, 但始终高于相同条件下的 Sn-Bi/N-EP 焊点。考虑到 130 ~ 170 °C 温度区间内的热循环试验对于环氧树脂固化层几乎没有影响, 那么焊点的剪切强度降低的原因可能与焊点和铜板的界面金属间化合物有关。

2.4 焊点与铜板界面的微观形貌分析

对焊点与铜板的界面金属间化合物进行了对比分析, 如图 9、10 所示。

图 9 和图 10 中的 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别为不同热循环周次的焊点样品的界面微观形貌, 不同

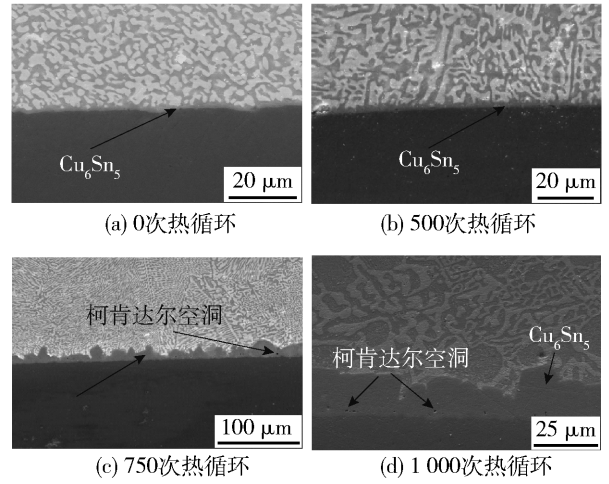


图 9 Sn-Bi/EP 焊点截面的 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of cross-sections of solder joints of Sn-Bi/EP

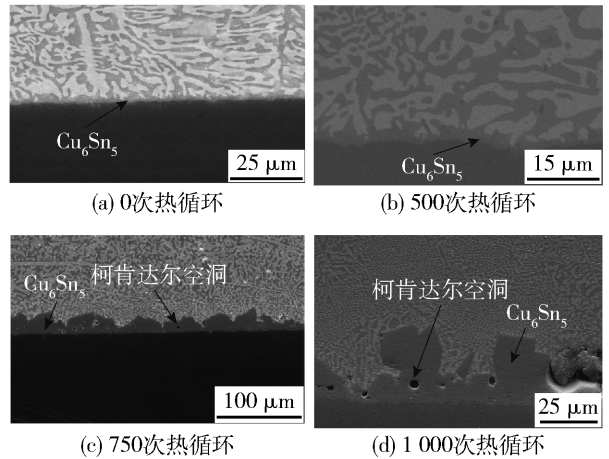


图 10 Sn-Bi/N-EP 焊点截面的 SEM 照片

Fig. 10 SEM photos of cross-sections of solder joints of Sn-Bi/N-EP

热循环周次的焊点样品的界面金属间化合物 (intermetallic compound, IMC) 的厚度如表 1 所示。

表 1 Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的金属间化合物厚度
Table 1 IMC thickness of solder joints of Sn-Bi/EP and Sn-Bi/N-EP

样品	热循环周次			
	0	500	750	1 000
Sn-Bi/EP	1 ~ 3	2 ~ 3	5 ~ 25	10 ~ 25
Sn-Bi/N-EP	1 ~ 3	2 ~ 3	10 ~ 30	10 ~ 35

首先对比热循环试验开始前的 Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的界面微观组织, 分别如图 9(a) 和 10(a) 所示, 二者差别不明显, 金属间化合物 Cu_6Sn_5

的厚度在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 。随着热循环周次的增加,界面金属间化合物厚度有所增长,并伴随有孔洞缺陷。

当热循环周次在 500 以内时, Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的金属间化合物 Cu_6Sn_5 的厚度变化不大,分别如图 9(b) 和 10(b) 所示。与此相应,图 7 中的电导率和图 8 中的剪切强度的变化也很小。当热循环周次在 750 以上时, Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的金属间化合物 Cu_6Sn_5 的厚度都有较明显的增长,且 Sn-Bi/N-EP 焊点的 Cu_6Sn_5 厚度增长更快,分别如图 9(c) 和 10(c) 所示。随着热循环周次继续增加,到 1 000 次时,界面出现了柯肯达尔空洞,且 Sn-Bi/N-EP 焊点界面的柯肯达尔空洞更多,孔径更大,分别如图 9(d) 和 10(d) 所示。总体来说,同样的热循环条件下, Sn-Bi/EP 焊点界面的金属间化合物增长比 Sn-Bi/N-EP 焊点更缓慢,缺陷更少。

由此可以推断,环氧树脂固化物可以一定程度上抑制界面金属间化合物的生长,提高焊点的热稳定性。受界面微观组织影响的还有焊点的电导率和剪切强度,由图 7、8 可见,电导率和剪切强度随热循环周次的变化,在热循环 750 次后出现了相对明显的变化,且 Sn-Bi/N-EP 比 Sn-Bi/EP 的电导率和剪切强度略低。也就是说,在热循环达到 750 次以后,界面 Cu_6Sn_5 的厚度增加及缺陷增多,导致电导率减小、剪切强度降低。焊点界面 Cu_6Sn_5 的厚度增加越多、缺陷越显著,性能下降越明显。因此,焊点电导率和剪切强度随热循环周次的变化规律,其内因是焊点界面微观结构的变化。

综上所述,以 Sn-Bi/N-EP 焊点为参照,通过对比分析焊点界面微观结构的变化,以及电导率和剪切强度的变化规律,证实了环氧树脂壳层对 Sn-Bi/EP 焊点的热稳定性的影响。其次,焊后残留物被环氧树脂壳层包裹,降低了其对焊点可靠性的不利影响。此外,由于固化的环氧树脂壳层致密且稳定,随着热循环周次的增加,其对合金焊料的保护作用也将越来越显著。

3 结论

在 $130 \sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间内,对自制环氧基 Sn-Bi 焊膏和商用 Sn-Bi 焊膏(不含可固化树脂)形成的焊点分别进行了热循环试验,考察了焊点的电导率、剪切强度和界面金属间化合物随热循环次数的变化规律,对环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点热稳定性及其影响因素进行了分析讨论,得到以下结论:

1) 与传统 Sn-Bi 焊膏相比,环氧基 Sn-Bi 焊膏的焊点外围的环氧树脂固化物不影响焊点与铜板的电气连接效果,电导率初始值与传统 Sn-Bi 焊膏相当。随着热循环周次的增加, Sn-Bi/EP 焊点电导率降低趋势比 Sn-Bi/N-EP 焊点更小,即 Sn-Bi/EP 焊点更稳定。

2) Sn-Bi/EP 焊点外围的环氧树脂固化物可明显提高焊点与铜板的连接强度,与 Sn-Bi/N-EP 相比, Sn-Bi/EP 焊点的剪切强度提高了约 25%。在热循环试验中,尽管焊点剪切强度随热循环周次的增加而略有降低,但始终高于相同条件下的 Sn-Bi/N-EP 焊点 25% 左右。

3) Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的电导率和剪切强度随热循环周次的变化,其内因是焊点界面微观结构的变化。当热循环周次在 750 以上时, Sn-Bi/EP 和 Sn-Bi/N-EP 焊点的金属间化合物 Cu_6Sn_5 的厚度有较明显的增长,孔洞缺陷增多。但同样条件下, Sn-Bi/EP 焊点界面的金属间化合物增长比 Sn-Bi/N-EP 焊点更缓慢,缺陷更少,即 Sn-Bi/EP 焊点界面更稳定,可能与致密且稳定的固化环氧壳层对合金焊点的保护作用有关。

参考文献:

- [1] ABTEW M, SELVADURAY G. Lead-free solders in microelectronics [J]. *Materials Science & Engineering*, 2000, 27: 95-141.
- [2] TUMMALA R, RYMASZEWSKI E J, KLOPFENSTEIN A G. *Microelectronics packaging handbook* [M]. Boston: Springer, 1997.
- [3] CHEN J B, LI C, WU Y P. Study on rapid thermal cycling by inducted heating for microstructure of single Sn-Ag-Cu solder joint [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17: 237-243.
- [4] CHEN J, XIE Y, HE Z, et al. Analysis on the thermal fatigue behavior of single Sn-Ag-Cu solder joint [C] // *The 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1-4.
- [5] LIU Y X, CHU Y C, TU K N. Scaling effect of interfacial reaction on intermetallic compound formation in Sn/Cu pillar down to $1 \mu\text{m}$ diameter [J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 146-152.
- [6] TU K N, LIU Y X. Recent advances on kinetic analysis of solder joint reactions in 3D IC packaging technology [J]. *Materials Science & Engineering: R*, 2019, 136: 1-12.
- [7] LAI Y S, CHIU Y T, CHEN J. Electromigration reliability and morphologies of Cu pillar flip-chip solder joints with

- Cu substrate pad metallization[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(10): 1624-1630.
- [8] MOKHTARI O, NISHIKAWA H. Correlation between microstructure and mechanical properties of Sn-Bi-X solders [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 831-839.
- [9] LIU P L, SHANG J K. Interfacial embrittlement by bismuth segregation in copper/tin-bismuth Pb-free solder interconnect [J]. *Journal of Materials Research*, 2011, 16(6): 1651-1659.
- [10] PANG X Y, SHANG P J, WANG S Q, et al. Weakening of the Cu/Cu₃Sn (100) interface by Bi impurities[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(8): 1277-1282.
- [11] YANG Q L, SHANG J K. Interfacial segregation of Bi during current stressing of Sn-Bi/Cu solder interconnect [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34: 1363-1367.
- [12] DANIEL L, WONG C P. *Materials for advanced packaging* [M]. New York: Springer International Publishing, 2017.
- [13] MYUNG W R, KIM Y, JUNG S B. Mechanical property of the epoxy-contained Sn-58Bi solder with OSP surface finish [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 615: S411-S417.
- [14] MYUNG W R, KIM Y, JUNG S B. Evaluation of the bond ability of the epoxy-enhanced Sn-58Bi solder with ENIG and ENEPIG surface finishes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44: 4637-4645.
- [15] MYUNG W R, KIM Y, KIM K Y, et al. Drop reliability of epoxy-contained Sn-58 wt. % Bi solder joint with ENIG and ENEPIG surface finish under temperature and humidity test[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45: 3651-3658.
- [16] KIM J, MYUNG W R, JUNG S B. Effects of aging treatment on mechanical properties of Sn-58Bi epoxy solder on ENEPIG-surface-finished PCB [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(11): 5895-5903.
- [17] LIU L, XUE S B, LIU S Y. Mechanical property of Sn-58Bi solder paste strengthened by resin [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2018, 8(11): 2024.
- [18] LUAN J E, TEE T Y, PEK E, et al. Advanced numerical and experimental techniques for analysis of dynamic responses and solder joint reliability during drop iMPact [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006, 29(3): 449-456.
- [19] LO J C C, JIA B F, LIU Z, et al. Reliability study of surface mount printed circuit board assemblies with lead free solder joints [J]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2008, 20(2): 30-38.
- [20] SAMAVATIAN V, IMAN-EINI H, AVENAS Y, et al. Effects of creep failure mechanisms on thermomechanical reliability of solder joints in power semiconductors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 8956-8964.
- [21] DEPIVER J A, MALLIK S, AMALU E H. Thermal fatigue life of ball grid array (BGA) solder joints made from different alloy compositions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 125: 105447.
- [22] MOROOKA K, KARIYA Y. Thermal fatigue life prediction of BGA solder joints using a creep constitutive equation incorporating microstructural coarsening effect [J]. *Materials Transactions*, 2021, 62(2): 205-212.
- [23] LI Q Y, YANG X J, LI C F. Solder joint structure of Sn-58Bi solder paste with epoxy-based flux [C] // *The 6th Annual International Workshop on Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Ebooks, 2020: 1622-1627.

(责任编辑 杨开英)