

In 对 SnBiAg 焊料微观结构及力学性能的影响

申兵伟, 徐明玥, 杨尚荣, 刘国化, 谢 明*, 张 巧

(昆明贵金属研究所, 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 使用电磁感应加热炉制备 Sn-35Bi-0.3Ag- x In 低温无铅焊料, 采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、万能拉伸试验机、维氏硬度计, 研究添加 In 元素对焊料的物相、组织结构、机械性能的影响。结果表明, 添加 In 元素固溶到焊料基体中, 细化了焊料组织结构。合金焊料的抗拉强度也随着 In 元素含量的增加而增大。但是其硬度, 延展性却随着 In 元素含量的增加先增加后降低。此外, 当添加 0.5%含量的 In 时, 析出的 Bi 相减少, 延展性得到提高, 焊料的综合力学性能较好。

关键词: 低温无铅焊料; 组织结构; 机械性能; 延展性

中图分类号: TG425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)02-0015-07

Effect of In on microstructure and mechanical properties of SnBiAg solders

SHEN Bingwei, XU Mingyue, YANG Shangrong, LIU Guohua, XIE Ming*, ZHANG Qiao

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming Insitute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: SnBiAg- x In, a kind of low temperature lead-free solder, was prepared by electromagnetic induction heating furnace. X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), universal tensile testing machine and Vickers hardness tester were used to study the effect of In on the phase, microstructure and mechanical properties of the solder. The results show that the addition of In element into the solder matrix can refine the organizational structure of the solder. The tensile strength of the alloy solder increases with the increase of In content, however, the hardness and ductility increase first and then decrease. In addition, when the amount of In is 5% in the solder, the precipitated Bi phase is accordingly reduced, leading to an improvement in the ductility and comprehensive mechanical properties of the solderr.

Key words: low temperature lead-free solder; organizational structure; mechanical properties; ductility

在电子工业中, Sn-37Pb 焊料因其独特的性能而得到广泛的应用。但是 Pb 对人体神经有害已经引起了国际社会的广泛关注。随着“限铅令”的呼声越来越高, 无铅焊料的研究已成为电子行业的热门话题^[1]。近年来, 为取代 Sn-37Pb 焊料, 许多 Sn 基无铅焊料如 SnAgCu、SnCu、SnZn、SnBi 焊料等被开发出来作为 Sn-37Pb 焊料的替代品^[2-5]。其中,

SnBi 焊料由于其熔点低、润湿性能好、抗剪切强度高特点, 被认为是无铅焊料合金的合适替代品^[6]。然而, 由于 Sn-Bi 焊料在平衡凝固时不形成化合物, 而是形成层状结构的富 Sn 相和 Bi 相, 在焊料冷却时会在 Sn 基体产生 Bi 的偏析, 从而导致焊料发生脆性断裂, 不利于生产加工^[7], 且抗疲劳较差等问题也严重影响其在电子封装等方面的应用。

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家科技部“科技助力经济 2020”国家重点项目; 云南省重大科技专项(202002AB080001-1-6); 云南省重大科技专项(202002AB080001-1); 云南省科技人才与平台计划(202105AC160002, 202105AE160027); 国家自然科学基金(51961016)

第一作者: 申兵伟, 男, 硕士研究生; 研究方向: 贵金属材料; E-mail: 2265489536@qq.com

*通信作者: 谢 明, 男, 博士, 研究员; 研究方向: 贵金属材料; E-mail: powder@ipm.com.cn

为了改善 Sn-Bi 焊料的加工性能, 研究人员通过颗粒强化改善 Sn-Bi 焊料合金的组织性能。通过颗粒强化(Cr、La、Ce、Ni 碳纳米管)的方式可以改善 Sn-Bi 焊料本身脆性的问题, 且还可以提高焊点的剪切强度^[8-11]。其中, 在 Sn-Bi 焊料中添加 Ag 元素的效果最佳^[12]。

目前已对 Sn-Bi 基低温无铅焊料进行了大量的研究, 但是, 在 Sn-35Bi-0.3Ag 焊料的基础上添加 In 元素的研究还很少, 且 In 元素是一种白色金属, 其质地较软, 可塑性高, 其晶体结构为面心四方结构, 加入合金中可以提高合金的力学性能。因此, 本文以 Sn-35Bi-0.3Ag 合金焊料为基础, 研究不同含量 In 的添加对 Sn-35Bi-0.3Ag(以下简称 SnBiAg)合金焊料的物相、组织结构及力学性能的影响。

1 实验

1.1 焊料的制备

本实验使用纯度大于 99.99%(质量分数, 下同)的 Sn、Bi、Ag、In 制备出 SnBiAg-xIn ($x=0$ 、0.5、1.0、1.5)(以下简称 SnBiAgIn)合金焊料。首先使用 Sn 与高熔点的 Ag 按一定比例在电磁感应加热炉中制备出中间合金, 再与低熔点的 Bi、In 制备成 SnBiAgIn 合金焊料, 之后再焊料重熔 3 次, 以保证焊料的成分均匀。制备过程中向坩埚中加入少量熔盐(KCl:LiCl=1.3:1.0)防止焊料氧化。制备完成后用线切割机将焊料切成哑铃状金属片, 以便于拉伸实验的进行, 其形状如图 1 所示。

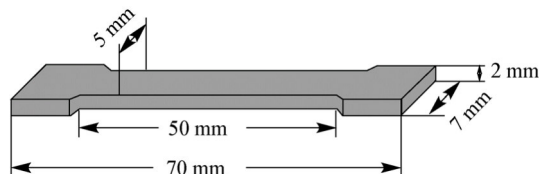


图 1 拉伸试样的示意图

Fig.1 Schematic diagram of the tensile specimen

1.2 材料组织性能的表征

为了研究添加 In 形成的不同合金焊料的显微结构变化, 将制备好的 SnBiAgIn 合金焊料镶嵌在环氧树脂中, 然后用不同粒度的砂纸打磨, 并用 $0.3 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ 悬浮液抛光。最后, 使用具有背散射电子(BSE)成像模式的扫描电子显微镜(SEM, 日立 S3400)进行微观结构观察。使用能谱仪(EDS)确定焊料中各物相的化学成分。在 SEM 观察之前, 使用溅射涂层用铂涂覆样品以避免充电效应。此外, 在室

温下, 使用 X 射线衍射仪(XRD, 日本理学 X-RAY Diffractometer Smart Lab TM 9 kW)测试焊料合金的物相; 使用维氏硬度计(HXS-1000A)在 300 N 的施加载荷下停留 10 sec, 测量合金焊料的显微硬度; 使用万能拉伸试验机(AG-X100 kN)以 2 mm/min 的拉伸速度测试合金焊料的力学性能。

2 结果与讨论

2.1 SnBiAgIn 合金的 XRD 分析

图 2 为 SnBiAgIn 合金焊料的 XRD 物相分析结果。从图中可以看出, 在 SnBiAg 焊料中出现了三种物相: 体心立方结构的 β -Sn 相、菱形结构的富 Bi 相以及密排六方结构 Ag_3Sn 相。在焊料中添加 In 元素后, 却没有发现新相的生成。这可能是由于添加 In 元素的含量较少, 设备没有检测出来; 其二是因为 Sn 对 In 有一定的固溶度(由 Sn-In 相图^[13]可知), 添加少量的 In 几乎固溶在 Sn 的基体之中, 因此没有发现新相的生成。

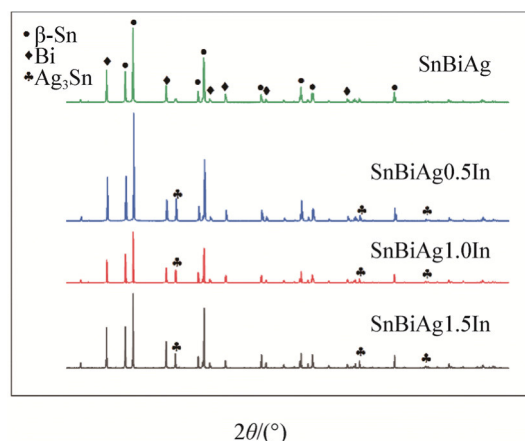


图 2 SnBiAgIn 合金焊料的 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of SnBiAgIn alloys

表 1 为 SnBiAgIn 合金焊料 β -Sn 相、富 Bi 相和 Ag_3Sn 相的晶体结构、晶格参数和晶胞体积。可看出, 与 SnBiAg 焊料相比 SnBiAgIn 合金焊料中 β -Sn 相及富 Bi 相的晶胞体积随着 In 含量的增加而减小, 但合金焊料中 β -Sn 相和富 Bi 相的晶系仍然保持体心立方和菱形结构。表明晶胞均匀膨胀或收缩, 衍射线只是移动了它们的位置^[14]。具体而言, β -Sn 中的晶格参数、晶面间距和晶胞体积都随着 In 的加入而降低, 表明少量的 In 可以使焊料的微观结构均匀细化。而轴比(c/a)保持稳定在 0.546 和 2.609, 表明晶胞均匀收缩, 晶胞对称性基本没有变化。

表 1 SnBiAgIn 合金焊料各物相的晶体结构、晶格常数和晶胞体积

Tab.1 Crystal structure, lattice parameters and cell volume of SnBiAgIn alloy solder

合金	物相	晶体结构	晶格常数			晶面间距/nm	晶胞体积/nm ³
			<i>a</i> /nm	<i>c</i> /nm	(<i>c/a</i>)/nm		
Sn-35Bi-0.3Ag	β-Sn	体心立方	0.5833	0.31825	0.0546	0.29163	0.10827
	Bi	菱形结构	0.4546	1.1872	0.2609	0.32801	0.2123
	Ag ₃ Sn	密排六方结构					
	β-Sn	体心立方	0.5831	0.3182	0.0546	0.29163	0.1082
SnBiAg0.5In	Bi	菱形结构	0.4546	1.1862	0.2609	0.328	0.21225
	Ag ₃ Sn	密排六方结构					
	β-Sn	体心立方	0.58327	0.3182	0.0546	0.29155	0.10825
SnBiAg1.0In	Bi	菱形结构	0.4533	1.186	0.2609	0.32705	0.20993
	Ag ₃ Sn	密排六方结构					
	β-Sn	体心立方	0.58326	0.31821	0.0546	0.29150	0.10825
SnBiAg1.5In	Bi	菱形结构	0.4533	1.1797	0.2609	0.32705	0.2118
	Ag ₃ Sn	密排六方结构					

2.2 SnBiAgIn 合金组织结构

图 3 为 SnBiAgIn 合金焊料的扫描电镜背散射电子形貌像，相应的能谱分析结果列于表 2。

从图 3 可见，明亮且连续的类型 Bi 相均匀地分散在 β-Sn 基体中，且少量的 Ag₃Sn 均匀地分布 β-Sn 中，细化焊料组织，提高焊料的机械性能^[15]。添

加少量的 In 元素后，没有发现有新相的生成，说明 In 大部分固溶到焊料组织中，与 XRD 的检测结果相一致。且焊料组织中 Bi 相明显得到细化，更加均匀的分布在基体中，因此添加少量的 In 元素可以改善焊料的组织性能。

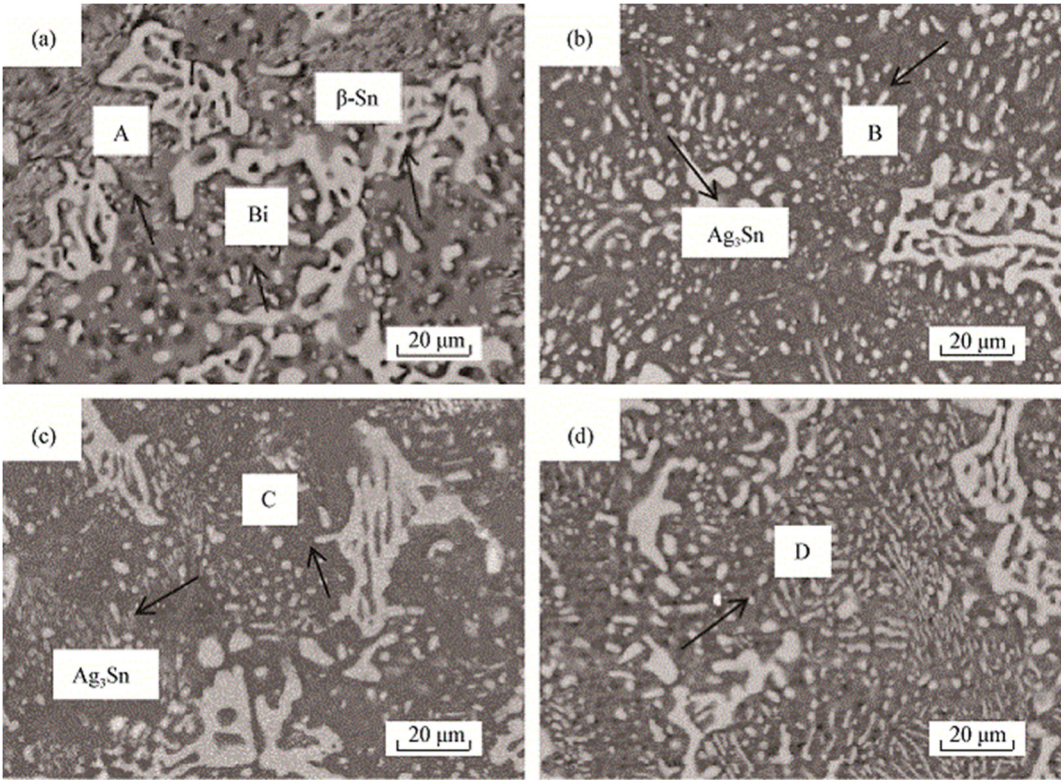


图 3 SnBiAg-xIn (x=0 (a)、0.5 (b)、1 (c)、1.5 (d))合金焊料的显微组织

Fig.3 Microstructure of SnBiAg-xIn (x=0 (a), 0.5 (b), 1 (c), 1.5 (d)) alloy solde

表 2 A、B、C、D 点的能谱结果分析

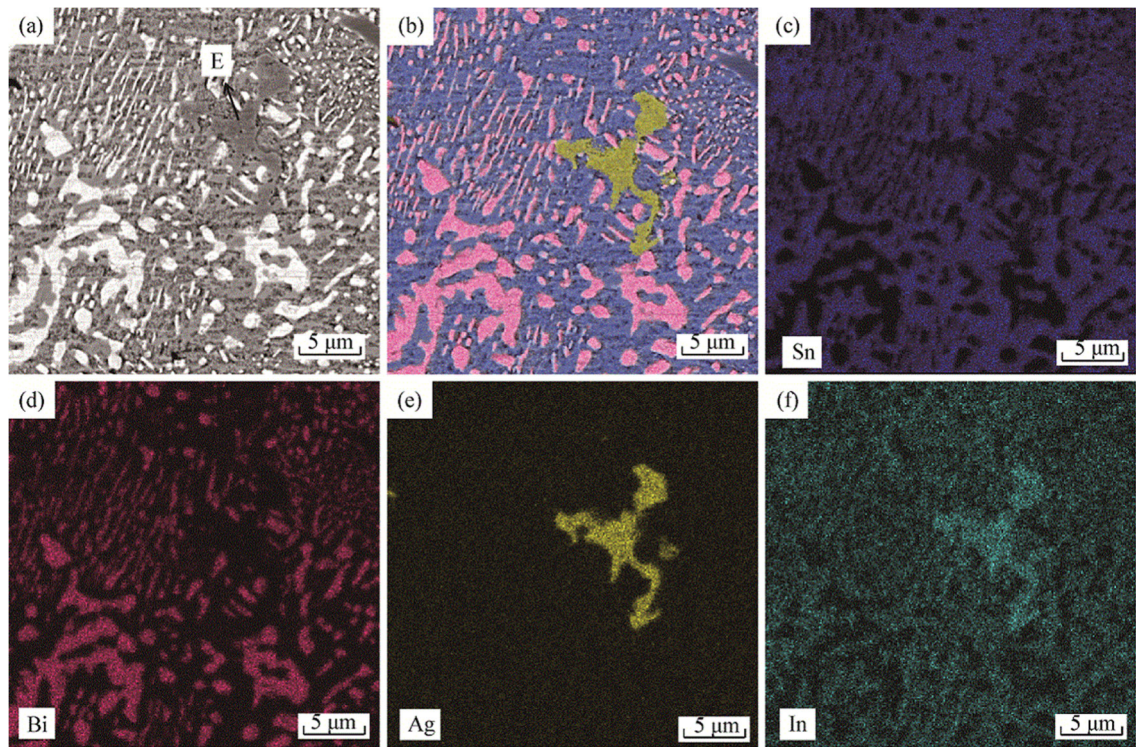
Tab.2 Analysis of EDS results of points A, B, C and D

元素	质量分数/%			
	A	B	C	D
Sn	92.61	85.62	90.47	92.14
Bi	06.20	11.02	06.03	04.63
Ag	01.19	00.26	00.27	00.16
In	0	03.10	03.23	03.07

从 EDS 能谱结果(表 2)可知,当添加 0.5%的 In 时,发现固溶在基体中的 Bi 元素含量增加,含量从 6.02%提高至 11.02%,析出的 Bi 相减少;但当添加

超过 1.0%时,固溶在基体中的 Bi 元素含量减少降至 4.63%,析出的 Bi 相增加。这是由于 In 具有与 Sn-Bi 焊料相类似的晶体结构及电负性,且它的原子半径(1.66)介于 Sn(1.58)与 Bi(1.7)之间,更易于形成固溶体^[16](原子半径差较小的元素形成固溶体时晶格畸变小),当添加少量(<1.0%)的 In 元素时,In 会充当 Sn、Bi 元素固溶的桥梁,提高 Bi 元素在 Sn 基体中的固溶度。而当添加 In 元素过多(>1.0%)时,会降低焊料体系的畸变能,从而析出部分 Bi 原子。

为了探究各个元素在焊料中的分布情况,对 SnBiAg1.5In 合金焊料进行 EDS 元素面扫描,图 4 为 SnBiAg1.5In 合金焊料的元素面扫描图。



(a). SEM; (b). 元素面分布(Element plane distribution); (c). Sn; (d). Bi; (e). Ag; (f). In

图 4 SnBiAg1.5In 的显微组织和元素面扫描图

Fig.4 Microstructure and element mapping of SnBiAg1.5In

从图 4 中可以清晰的发现各个元素都鲜明地分布在合金焊料中,且添加的 In 元素更是均匀地分布在焊料基体中,对焊料起到固溶强化的作用,提高焊料的力学性能;对图 4(a)中的 E 点进行能谱分析,Ag 元素占比为 59%,Sn 元素占比为 32%,In 元素占比为 7.8%,说明 In 元素参与了 Ag、Sn 元素的反应,生成了 AgSnIn 化合物。其以第二相的方式分布在焊料基体中,提高合金焊料组织性能。

2.3 SnBiAgIn 合金的力学性能

表 3 为 SnBiAgIn 合金焊料的维氏硬度。

表 3 SnBiAgIn 合金焊料的硬度

Tab.3 Hardness of SnBiAgIn alloy solder

$\omega_{In}/\%$	0	0.5	1.0	1.5
硬度/HV _{0.3}	23	24.2	19.8	18.6

从表 3 中可以看出,SnBiAg 合金焊料的维氏硬度为 23,在焊料中添加微量的 In 元素后,焊料的维氏硬度先增加后减少。添加 0.5%的 In 元素后,焊料的维氏硬度达到 24.2,提高了 5.2%,添加 1.0%的 In 元素后,焊料的硬度有所下降,降至 19.8。添

加 1.5% 的 In 元素后, 焊料的硬度更低为 18.6, 下降了 19.1%。材料的微观结构对材料的力学性能有很大影响, 结合图 3 焊料的微观结构进行分析, 虽然 In 的硬度较低, 但添加 0.5% 的 In 元素后, In 元素大部分固溶在合金焊料中, 对合金焊料起固溶强化(In 原子与 Sn 原子的尺寸有所不同, 会引起 Sn 基体晶格发生畸变, 阻碍位错的运动)的作用, 且少量 In 元素的加入, 提高了 Bi 相在焊料中的固溶度, 以及细化了析出相 Bi 相, 因而提高了合金焊料的硬度; 当添加的 In 含量增多时, 析出的 Bi 相增多, 弱化了 Bi 相对焊料的固溶作用, 且随着 In 含量的增加, In 对焊料的软化作用逐渐成为主导作用, 因此, 随着 In 含量的增加, 焊料的硬度又逐渐下降。

为了更好地了解添加 In 元素对 SnBiAg 焊料机械性能的影响, 通过拉伸试验测定 SnBiAgIn 合金焊料的抗拉强度与延展性, 拉伸实验结果列于表 4。

表 4 SnBiAgIn 合金焊料的拉伸性能

Tab.4 Tensile properties of SnBiAgIn alloy

$\omega_{\text{In}}/\%$	0	0.5	1.0	1.5
抗拉强度/MPa	68	70.8	71.4	79.6
延伸率/%	24.5	27.4	12.4	9.8

从表 4 中可以看出, SnBiAg 合金焊料的抗拉强度为 68 MPa, 在焊料中添加微量的 In 元素后, 合金焊料的抗拉强度逐渐升高。当添加少量的 In(<1.0%)时, 其抗拉强度的变化并不明显, 提升至 71.4 MPa; 当添加 In 的含量为 1.5%时, 合金焊料的抗拉强度明显提高, 提升至 79.6 MPa, 较 SnBiAg 合金焊料提升了 17.1%。合金的抗拉强度与众多因素有关, 其中合金化和第二相强化就是其中两种。结合图 3 微观结构分析, 添加的 In 元素大部分固溶在 Sn 基体中, 对焊料起了固溶强化的作用; 且加入少量 In(<1.0%)元素后, 焊料中析出的 Bi 相变得细小。根据细晶强化霍尔-佩奇方程可知^[17]:

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

其中, σ 为屈服强度, σ_0 为单晶的屈服强度, K 是与材料有关的常数, d 是颗粒的大小。In 元素固溶焊料基体中, 细化了 Bi 相晶粒, 使其弥散地分布在焊料中, 因而提高了焊料的抗拉强度。而当添加 1.5% 含量的 In 后, 析出的 Bi 相增多, 其均匀弥散的分布在焊料基体中, 根据 Orowan 机制, 在拉

伸试验中, 焊料基体 Sn 相和 Bi 相之间的相互作用抑制了位错的运动, 导致两相晶粒间位错的弯曲。当位错发生弯曲时, 就会出现背应力。这表明位错的运动将受到抑制, 从而导致抗拉强度的提高。所以添加较多的 In 时可以有效地强化焊料组织, 提高焊料的机械性能。

从表 4 中还可以看出, SnBiAg 合金焊料的延伸率为 24.5%, 随着 In 元素的增加, SnBiAgIn 合金焊料的延伸率先升高后降低。当添加 In 元素为 0.5% 时, 合金焊料的延伸率为 27.4%, 提高了 11.8%; 当添加 In 元素为 1.5% 时, 合金焊料的延伸率最小, 为 9.8%, 同比下降了 41.4%, 说明 In 的含量显著影响合金焊料的塑性。材料的化学成分及组织结构对塑性有很大影响。在 SnBiAg 合金的组成成分中, Bi 的质地较硬, 大量析出的 Bi 相会严重影响焊料的塑性。结合图 3 焊料微观组织可知, 在合金中加入少量的 In(<0.5%)元素, 降低了 Bi 相的析出, 提高了合金焊料的塑性, 可以改善合金焊料的加工性能。在合金焊料中加入较多的 In(>0.5%)元素时, 合金中析出的 Bi 相增多, 降低了合金焊料的塑性, 且其晶界也会相应的增加, 滑移变形时位错移动到晶界附近将会受到阻碍并堆积, 导致变形抗力提高, 从而进一步降低了合金焊料的塑性, 不利于焊料的机械加工。

2.4 SnBiAgIn 合金的断口形貌

图 5 为拉伸后试样的断口形貌。从图 5(a)可以看出, SnBiAg 断面出现解离台阶花样, 且其表面有 Bi 颗粒存在, 而 Bi 颗粒是硬而脆的。说明合金焊料是在极大外力作用下, 以极快速率沿着一定晶面(脆性富 Bi 相的某些晶面)产生的断裂^[18], 因此判断其断裂方式为解理断裂。如图 5(b)所示, 当添加 In 元素含量为 0.5% 时, 发现解离台阶花样有所减少, 因此可以判断出其塑性有所提高。如图 5(c~d)所示, 发现当添加 1.0%、1.5% 的 In 元素时, 合金焊料的微观端口处出现了蜂窝状孔隙, 其孔隙内存在一些夹杂物, 通过能谱分析发现这些夹杂物为 Bi 颗粒, 且在孔隙周围同样发现了 Bi 颗粒的存在。这些 Bi 颗粒成为裂纹的潜在来源, 在拉伸力的作用下, 空洞内部的 Bi 颗粒将被拉出, 从而导致焊料的断裂。且由于 Bi 相的硬而脆的特性, 使得合金焊料的塑性进一步下降。根据上述分析可知, 断口形貌特征基本上与延伸率检测结果保持一致。

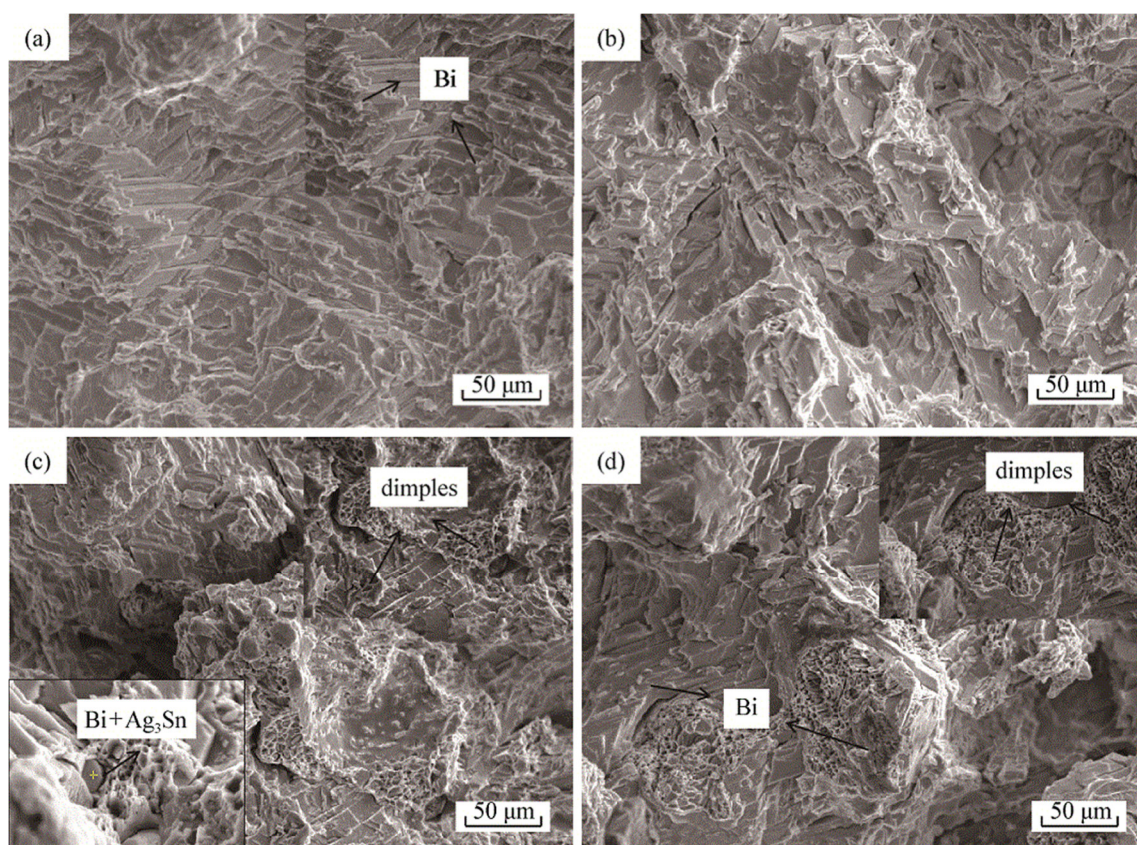


图 5 SnBiAg-xIn ($x=0$ (a)、0.5 (b)、1 (c)、1.5 (d))合金焊料的断口形貌

Fig.5 Fracture morphology of SnBiAg-xIn ($x=0$ (a), 0.5 (b), 1 (c), 1.5 (d)) alloy solder

3 结论

1) 将 In 添加到 Sn-35Bi-0.3Ag 合金焊料中, In 固溶于焊料基体中并均匀分布, 对焊料起到固溶强化的作用。

2) 对焊料微观结构分析发现, 添加 0.5%含量的 In 后, 细化了焊料组织, 增加了 Bi 在基体中的固溶度, 含量从 6.2%提高至 11.02%, 降低了 Bi 相的析出, 有利于提高了焊料的力学性能。

3) SnBiAgIn 合金焊料的硬度和塑性都随着 In 含量的增加先增大后减小。其抗拉强度随着 In 含量的增加而增加。综合考虑, 发现 SnBiAg-0.5In 合金焊料的机械性能最佳, 延展性最优, 有利于合金焊料的加工, 提高焊点的机械性能。

参考文献:

- [1] CHIANG H W, CHEN J Y, CHEN M C, et al. Reliability testing of WLCSP lead-free solder joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(5): 1032-1040.
- [2] KALAY Y E, KANTARCIOGLU A. Effects of Al and Fe additions on microstructure and mechanical properties of SnAgCu eutectic lead-free solders[J]. Materials Science & Engineering A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2014, 593: 79-84.
- [3] MAHIM Z, ABDUL RAZAK N R, SALLEH M A A M, et al. Enhancement of microstructural and physical properties of Sn-0.7Cu lead-free solder with the addition of SiC particles[J]. Solid State Phenomena, 2018, 280: 181-186.
- [4] XING W Q, YU X Y, LI H, et al. Microstructure and mechanical properties of Sn-9Zn-xAl₂O₃ nanoparticles ($x=0-1$) lead-free solder alloy: First-principles calculation and experimental research[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 678(10): 252-259.
- [5] XIONG M, ZHANG L, LEI S, et al. Effect of CuZnAl particles addition on microstructure of Cu/Sn58Bi/Cu TLP bonding solder joints[J]. Vacuum, 2019, 167: 301-306.
- [6] REN G, WILDING I J, COLINS M N. Alloying influences on low melt temperature SnZn and SnBi solder alloys for electronic interconnections[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 665: 251-260.
- [7] 申兵伟, 刘国化, 高勤琴, 等. 新型低温无铅焊料的研究

- 究进展[J]. 贵金属, 2022, 43(S1): 42-54.
- SHEN B W, LIU G H, GAO Q Q, et al. Research progress of new low temperature lead-free solder[J]. Precious Metals, 2022, 43(S1): 42-54.
- [8] ZHU W, ZHANG W, ZHOU W, et al. Improved microstructure and mechanical properties for SnBi solder alloy by addition of Cr powders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 805-813.
- [9] SHIUE Y Y, CHUANG T H. Effects of la addition on microstructure and mechanical properties of Sn-58Bi solders joints with osp pads[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2013, 52(3): 285-294.
- [10] BANG J O, LEE H S, JUNG S B. Fabrication of Sn-58Bi-xCe solder paste using electrical wire explosion method and its mechanical property[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 5: 3033-3037.
- [11] YANG L, WEI Z, LIANG Y, et al. Improved microstructure and mechanical properties for Sn58Bi solder alloy by addition of Ni-coated carbon nanotubes[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 642(26): 7-15.
- [12] 白海龙, 徐凤仙, 沙文吉, 等. 三元系 Sn-Bi-Ag 焊料合金相结构, 组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2019(1): 8.
- BAI H L, XU F X, SHA W J, et al. Phase structure, microstructure and properties of ternary Sn-Bi-Ag solder alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019(1): 8.
- [13] WU C, YU D Q, LAW C, et al. Properties of lead-free solder

- 【上接第 14 页】**
- [4] 陈亮维, 黄炳醒, 刘雄. Pd-20W 合金固溶体的结构分析[J]. 贵金属, 2002, 23(2): 33-37.
- CHEN L W, HUANG B X, LIU X. Structure analysis of Pd-20W solid solution alloy[J]. Precious Metals, 2002, 23(2): 33-37.
- [5] 《贵金属加工手册》编写组. 贵金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978: 180-181.
- [6] 李红恩, 沙爱学. TC18 钛合金热压参数对流动应力与显微组织的影响[J]. 材料工程, 2010(1): 85-88.
- LI H E, SHA A X. Effects of hot process parameters on flow stress and microstructures of TC18 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(1): 85-88.
- [7] 李波, 潘清林, 张志野, 等. 含钪 Al-Zn-Mg 合金的热变形行为和显微组织[J]. 材料工程, 2013(11): 6-11.
- LI B, PAN Q L, ZHANG Z Y, et al. Hot deformation behavior and microstructure of Al-Zn-Mg alloy containing Sc during hot compression at elevated temperature[J]. alloys with rare earth element additions[J]. Materials Science & Engineering R Reports, 2004, 44(1): 1-44.
- [14] MA Y, X LI, YANG L, et al. Effects of graphene nanosheets addition on microstructure and mechanical properties of SnBi solder alloys during solid-state aging[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 696: 437-444.
- [15] GAIN A K, ZHANG L. Interfacial microstructure, wettability and material properties of nickel (Ni) nanoparticle doped tin-bismuth-silver(Sn-Bi-Ag) solder on copper (Cu) substrate[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016, 27(4): 1-13.
- [16] 陈福祥. Sn-Bi-In 系列合金的界面行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- CHEN F X. Research on interface behavior of Sn-Bi-In series alloys[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [17] SUN L, CHEN M H, WEI C C, et al. Effect of thermal cycles on interface and mechanical property of low-Ag Sn1.0Ag0.5Cu(nano-Al)/Cu solder joints[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29: 9757-9763.
- [18] YANG L, WEI Z, YONG M, et al. Effects of Ni addition on mechanical properties of Sn58Bi solder alloy during solid-state aging[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 667(14): 368-375.
- Journal of Materials Engineering, 2013(11): 6-11.
- [8] NAKAI M, ETO T. New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 285(1/2): 62-68.
- [9] 王珏, 梅莹, 王浩宇. 铸态 690 合金的热压缩变形行为[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(9): 21-26.
- WANG J, MEI Y, WANG H Y. Hot compression behavior of as cast 690 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(9): 21-26.
- [10] POIRIER J P. 晶体的高温塑性变形[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
- [11] JAFARI M, NAJAFIZADEH A. Correlation between Zener-Hollomon parameter and necklace DRX during hot deformation of 316 stainless steel[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 501: 16-25.