

非常吻合,验证了数值模拟模型的准确性。

参 考 文 献

- [1] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2) : 299-305.
- [2] Lindgren L E. Computational welding mechanics: thermomechanical and microstructural simulations [M]. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [3] Ying L, Guo F. Simulation and validation of welding residual stresses based on non-linear mixed hardening model [J]. Strain, 2012, 48(5) : 406-414.
- [4] Preston R V, Shercliff H R, Withers P J, et al. Physically-based constitutive modelling of residual stress development in welding of aluminium alloy 2024 [J]. Acta Materialia, 2004,

52(17) : 4973-4983.

- [5] Sonne M R, Tutum C C, Hattel J H, et al. The effect of hardening laws and thermal softening on modeling residual stresses in FSW of aluminum alloy 2024-T3 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(3) : 477-486.
- [6] Xu J J, Gilles P, Duan Y G, et al. Temperature and residual stress simulations of the NeT single-bead-on-plate specimen using SYSWELD [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2012(S99-100) : 51-60.

作者简介: 郑 红, 1968 年出生, 学士, 高级工程师。主要从事新材料的焊接工艺性的研究工作, 已发表论文 5 篇。

时效温度对 Sn-0.7Cu-xFe 钎焊接头可靠性的影响

宋兵兵^{1,2} 杨 莉² 蒋立诚² 于华宽² 相积岑²

(1. 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215000; 2. 常熟理工学院 汽车工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘要 研究了时效温度对钎料 Sn-0.7Cu 及 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头微观组织和接头拉伸强度及断口形貌的影响规律。结果表明: 随着时效温度提高, 焊点组织粗化, 钎料中 Cu_6Sn_5 化合物形貌由针状向棒状转变, 且长大趋势较明显, Fe 颗粒的添加可以延缓时效过程中 Sn-0.7Cu-xFe 接头微观组织中 Cu_6Sn_5 的粗化程度; 钎焊接头抗拉强度随着时效温度提高呈现下降趋势, 且在相同时效温度下钎料 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头抗拉强度均高于 Sn-0.7Cu; 随着时效温度提高, Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料钎焊接头断口形貌主要由韧窝和河流解理花样组成, 接头的断裂机制随时效温度的升高由塑性断裂逐渐转变为脆性断裂。

关键词: 钎料接头 时效温度 微观组织 抗拉强度

中图分类号: TG407

0 序 言

电子元器件微型化, 装配密集化发展, 促进了电子封装产业的发展。电子元器件的可靠性很大程度上取

决于焊点的可靠性, 因此如何提高焊点的可靠性成为研究热点^[1-7]。Sn-Cu 系因其成本较低、易生产、易回收、杂质敏感性低、综合力学性能较好等原因, 在钎焊温度对元器件影响较低的波峰焊中已经得到广泛的应用, 成为波峰焊工艺中最有希望替代 Sn-Pb 钎料的产品, 并且在倒装焊中也得到了一定的应用^[8-10]。

国内外对于 Sn-Cu 系无铅钎料的研究主要通过集中通过添加不同含量的微量元素来改善钎料的性能, 从而

收稿日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 51401037, 51505040); 江苏省科技厅工业支持项目(项目编号: BK20141228)。

提高钎料焊点的可靠性并延长其使用寿命^[11]。葛进国等人^[12]研究发现添加适量 Ni 颗粒使 Sn-0.7Cu 无铅钎料基体中的 Cu_6Sn_5 弥散分布。闫焉服等人^[13]研究了 Ag 颗粒对 Sn-0.7Cu 钎料组织和性能的影响,Ag 颗粒可以提高 Sn-0.7Cu 钎料合金的拉伸性能和钎焊接头的抗蠕变寿命。杨莉等人^[14]研究了微量 Al 元素对 Sn-0.7Cu 无铅钎料组织和性能的影响,Al 元素的添加可以提高 Sn-0.7Cu 无铅钎料的拉伸强度和抗蠕变性能。周许升等人^[15]研究了时效时间对 Sn-0.7Cu 无铅钎料微观组织的影响,随着时效时间的增长, β -Sn 初晶晶粒长大, Cu_6Sn_5 金属间化合物颗粒数量减少、尺寸增大,并且颗粒间距增大。马超力等人^[16]研究了 Sn-0.7Cu 无铅钎料微观组织及力学性能在时效过程中的演变,随着时效的进行,抗剪强度不断下降,可有效的提高 Sn-Cu-Ni- α Pr 焊点的力学性能。

但是 Sn-Cu 系钎料熔点高,钎料组织中 Cu_6Sn_5 颗粒不稳定,在高温下容易长大,导致钎料的高温热疲劳性较差,对接头可靠性产生不利影响。文中研究不同温度下 Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头的微观组织、抗拉强度及拉伸断口的演变规律,为提高 Sn-0.7Cu 无铅钎料的可靠性研究提供理论支持。

1 试验材料及方法

钎料基体材料为 Sn-0.7Cu 无铅焊膏,增强相为粒径约为 50 μm 的 Fe 颗粒,基板材料为纯度约 99.99% 的紫铜片,其尺寸为 25 mm×25 mm×0.2 mm。

采用机械混合法制备 Sn-0.7Cu-0.05Fe 复合钎料,

在 F4N 型回流焊机进行钎焊接头的制备,回流最高温度为 260 $^{\circ}\text{C}$ 。将 Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头置于 DHG-9140A 鼓风干燥箱中分别进行不同温度 (60 $^{\circ}\text{C}$, 100 $^{\circ}\text{C}$, 140 $^{\circ}\text{C}$, 180 $^{\circ}\text{C}$) 的时效处理,时效时间均为 100 h。采用 GX51 型 Olympus 金相显微镜对时效后钎焊接头微观组织进行观察。采用 PTR1102 型强度结合测试仪测试钎焊接头拉伸强度,钎焊接头的拉伸尺寸为 20 mm×1 mm×0.9 mm,拉伸速率为 0.01 mm/s,测量三组数据取其平均值。再采用 ISPECTS50 型扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

2 试验结果及分析

2.1 时效温度对钎焊接头微观组织的影响

Sn-0.7Cu 及 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头微观组织在不同时效温度下保温 100 h 后的显微组织形貌分别如图 1 和图 2 所示。Sn-0.7Cu 钎料基体由初生 β -Sn 相和分布于 β -Sn 相上的 Cu_6Sn_5 颗粒组成,随着时效温度升高, Cu_6Sn_5 化合物不断粗化,由宽约 2 μm 、长约 5~10 μm 的针状逐渐演变为宽约 8~10 μm 、长约 30~50 μm 的棒状。这是因为钎料基体温度升高时,Sn, Cu 及微量 Fe 原子热运动加剧,Sn 和 Cu 原子倾向于在已形成的晶粒表面发生团聚并进一步长大。同一时效温度下,Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料中金属化合物尺寸比 Sn-0.7Cu 细小,同时 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料中 β -Sn 初晶的晶粒尺寸也相对较小,在 180 $^{\circ}\text{C}$ 下时效 100 h 后, Cu_6Sn_5 的形态演变为宽约 10 μm 、长约 30 μm 的棒状。这是因为 Fe 在 β -Sn 中的溶解度很低,大部分 Fe 以 FeSn_2 相形式析出或者作

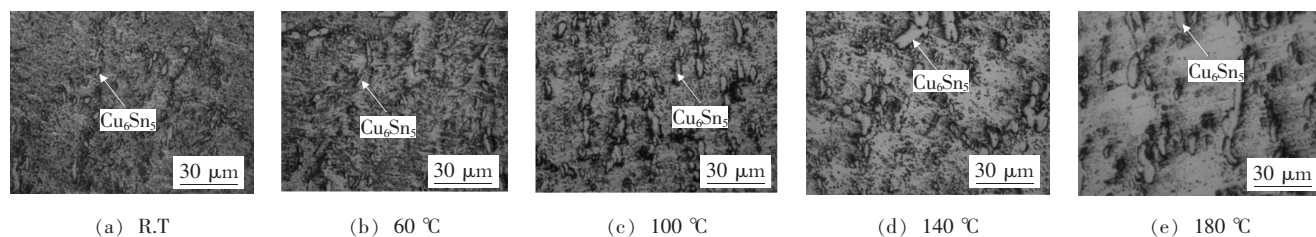


图 1 不同时效温度下 Sn-0.7Cu 钎焊接头组织形貌

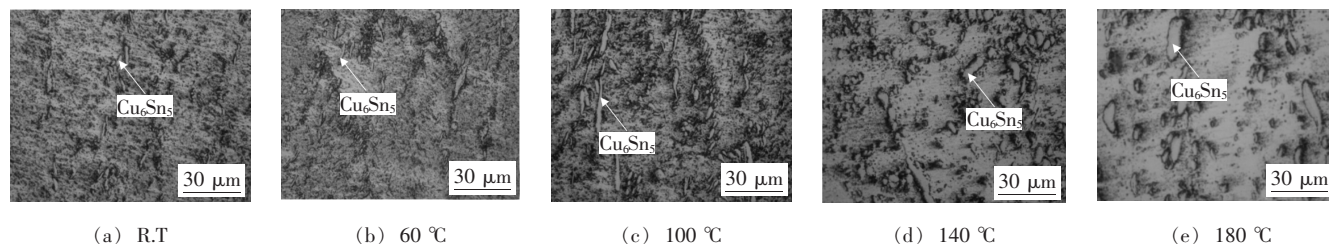


图 2 不同时效温度下 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料基体组织形貌

为非自发形核质点,使金属间化合物和 β -Sn 初晶晶粒得到细化^[17]。

2.2 时效温度对钎焊接头抗拉强度的影响

图3为在不同温度下等温时效100 h后的Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头抗拉强度。Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的抗拉强度随着时效温度增加均呈现下降趋势。室温时,抗拉强度分别为56 MPa和60 MPa,当时效温度升高至180℃时,抗拉强度分别降至37 MPa和41 MPa。随着时效时间的延长,Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的 Cu_6Sn_5 均呈现粗化的趋势,且 Cu_6Sn_5 在钎料接头中的分布不均匀。脆硬相 Cu_6Sn_5 和钎料 β -Sn的界面为性能薄弱区,在拉应力的作用下容易为裂纹提供形核基础,并沿着界面进行扩展而导致断裂。故Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的拉伸性能均随失效时间的延长而下降。相同时效温度下钎料Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的抗拉强度高于Sn-0.7Cu,这是因为添加的微量Fe起到了细化 Cu_6Sn_5 和钎料 β -Sn的作用,使 Cu_6Sn_5 在钎料基体分布较为弥散,从而以硬质第二相的作用阻碍了拉伸过程中位错的运动,从而提高了Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的抗拉强度^[18]。

2.3 时效温度对拉伸断口形貌的影响

图4和图5分别为Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头在不同温度下时效100 h后的拉伸断口形貌。当时效温度低于60℃时,Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头断口主要呈现为韧窝,说明此状态下Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的断裂形式主

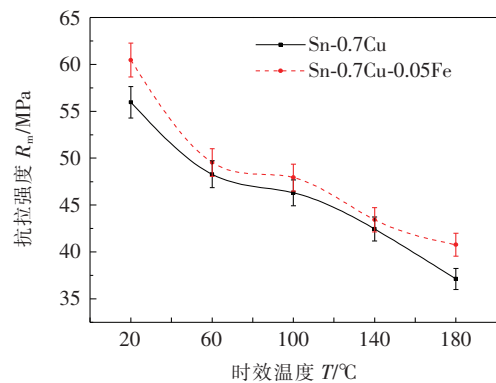


图3 时效温度对Sn-0.7Cu- α Fe钎焊接头抗拉强度的影响规律

要为塑性断裂。主要是因为Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头在低于60℃下时效100 h后, Cu_6Sn_5 和钎料组织均较为细小且分布较为弥散。随着时效温度的增加,Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头断口由韧窝和河流状解理花样组成,再演变成时效温度为180℃时的断口中主要为解理花样,说明此状态Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的断裂形式由塑性断裂和脆性断裂混合机制转变为脆性断裂机制。主要是由于随着时效温度的提高,Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头中的 Cu_6Sn_5 和钎料组织均粗化, Cu_6Sn_5 和钎料界面处形成的微裂纹在拉应力的作用下快速沿着界面方向长大而呈现撕裂状,从而在断口表面形成解理面^[19]。

在相同的时效条件下,Sn-0.7Cu-0.05Fe钎焊接头的韧窝较Sn-0.7Cu细小,且解理花样少。主要是因为

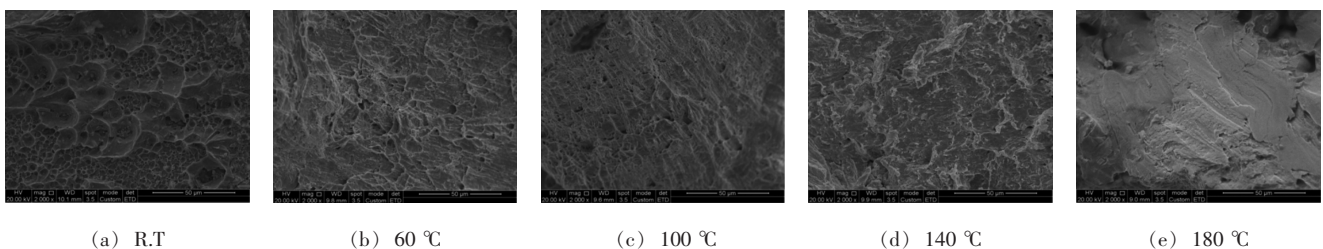


图4 不同时效温度下Sn-0.7Cu接头拉伸断口形貌

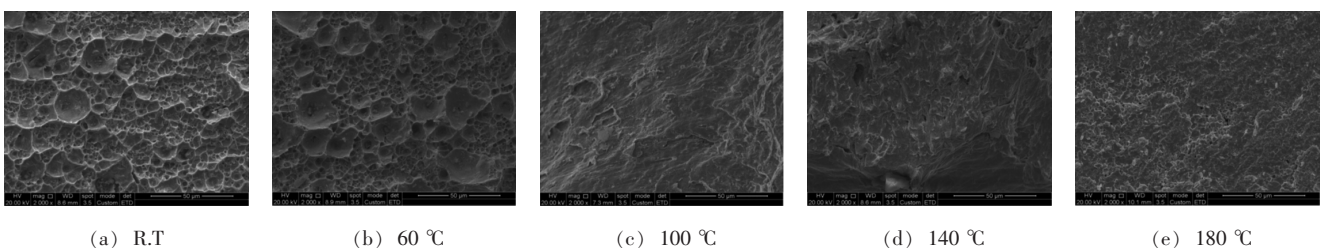


图5 不同时效温度下Sn-0.7Cu-0.05Fe接头拉伸断口形貌

Fe 颗粒的添加细化的 Cu_6Sn_5 , 降低了拉伸过程中的裂纹的形成趋势, 且 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头中的 Cu_6Sn_5 分布较 Sn-0.7Cu 弥散, 从而在拉伸过程中因阻碍位错运动形成的应力场分布更为均匀, 从而体现出 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头的拉伸强度较高, 断口的韧窝更多, 焊点的塑性更好。故 Fe 颗粒的添加可以改善 Sn-0.7Cu 钎料合金钎焊接头的可靠性。

3 结 论

(1) 随着时效温度的提高, Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎焊接头微观组织和 Cu_6Sn_5 化合物粗化, Cu_6Sn_5 化合物由针状逐渐演变为棒状。Fe 颗粒的添加可以抑制 Sn-0.7Cu- x Fe 钎料中 Cu_6Sn_5 的粗化程度。

(2) Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料钎焊接头的抗拉强度随着时效温度的升高逐渐降低, 同时 Sn-0.7Cu-0.05Fe 接头的抗拉强度要高于 Sn-0.7Cu。

(3) Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-0.05Fe 钎料钎焊接头断面形貌主要由韧窝和河流解理花样组成, 且随时效温度的升高钎料钎焊接头的断裂机制由塑性断裂逐渐转变为脆性断裂。Fe 颗粒因抑制了 Cu_6Sn_5 的粗化而改善 Sn-0.7Cu 钎料合金接头的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 向 可. 热载荷下无铅焊点可靠性电测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2008.
- [2] 朱 路, 杨 莉, 宋兵兵, 等. 纳米 Ag 颗粒对 Sn-58Bi 无铅钎料组织及焊点可靠性的影响 [J]. 焊接, 2017(7): 42-44.
- [3] 杨雪霞. 电子封装中金属间化合物力学性能的研究及焊点可靠性分析 [D]. 太原: 太原理工大学博士学位论文, 2013.
- [4] 张 宁, 邵浩彬, 时孝东, 等. 基板间距对超声协振复合钎焊 $\text{SnBi-}x\text{Al}_2\text{O}_3$ 微焊点组织及性能的影响 [J]. 焊接, 2016(3): 40-44, 75.
- [5] 颜秀文, 丘 泰, 张振忠. 无铅电子封装材料及其焊点可靠性研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2006(3): 5-8.
- [6] 元 鑫. 多芯片组件 (MCM) 焊点可靠性的有限元模拟与寿命的预测 [D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2006.
- [7] 杨 洁, 张柯柯, 周旭东, 等. 微连接焊点可靠性的研究现状 [J]. 电子元件与材料, 2005(9): 58-61.
- [8] 杜长华, 陈 方, 杜云飞. Sn-Cu、Sn-Ag-Cu 系无铅钎料的钎焊特性研究 [J]. 电子元件与材料, 2004(11): 34-

- 36.
- [9] 何大鹏, 于大全, 王来, C M L Wu. 铜含量对 Sn-Cu 钎料与 Cu、Ni 基板钎焊界面 IMC 的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006(4): 701-708.
- [10] 史益平, 薛松柏, 王俭辛, 等. Sn-Cu 系无铅钎料的研究现状与发展 [J]. 焊接, 2007(4): 14-18.
- [11] 李广东, 史耀武, 雷永平, 等. 微量元素改性 Sn-0.7Cu 系无铅钎料的研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2009, 2(28): 70-73.
- [12] 葛进国, 杨 莉, 刘海祥, 等. Sn0.7Cu- x Ni 无铅钎料界面组织与力学性能的研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 21(44): 237-239.
- [13] 闫焉服, 陈拂晓, 朱锦洪, 等. Ag 颗粒含量对 Sn-Cu 基复合钎料性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2007, 21(1): 102-106.
- [14] Yang L, Zhang Y C, Dai J, et al. Microstructure interfacial IMC and mechanical properties of Sn-0.7Cu- x Al ($x = 0 - 0.075$) lead-free solder alloy [J]. Materials and Design, 2015, 67(5): 209-216.
- [15] 周许升, 龙伟民, 沈元勋, 等. Sn-0.7Cu 无铅钎料显微组织及力学性能在时效过程中的演变 [J]. 焊接, 2013(11): 16-19.
- [16] 马超力, 薛松柏, 李 阳, 等. 时效对 Sn-Cu-Ni- x Pr/Cu 焊点组织与性能的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 85-88.
- [17] Mahdaviard M H, Sabri M F M, Said S M, et al. Effects of Fe and Bi minor alloying on mechanical, thermal, and microstructural properties of Sn-0.7Cu solder alloy [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(7): 3673-3682.
- [18] 葛进国, 杨 莉, 刘海祥, 等. Fe 对 Sn0.7Cu 无铅钎料显微组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 2(45): 205-210.
- [19] Yang L, Ge J, Zhang J, et al. Investigation on the microstructure, interfacial IMC layer, and mechanical properties of Cu/Sn-0.7Cu- x Ni/Cu solder joints [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 7(45): 3766-3775.

作者简介: 宋兵兵, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电子封装。

通讯作者: 杨 莉, 1966 出生, 博士, 教授。主要从事材料加工及表面强化方面的教学和科研工作, 已主持完成省部级以上项目 10 余项。