

# Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE 钎料时效焊点界面 IMC 研究

Research of Intermetallic Compounds at Interface of

Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE Solder Joints During Aging

张柯柯<sup>1</sup>, 韩丽娟<sup>2</sup>, 王要利<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 祝要民<sup>1</sup>

(1 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003;

2 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

ZHANG Ke-ke<sup>1</sup>, HAN Li-juan<sup>2</sup>, WANG Yao-li<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, ZHU Yao-min<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science & Engineering, Henan University of Science

and Technology, Luoyang 471003, Henan, China; 2 Pinggao Group

Co., Ltd., Pingdingshan 467001, Henan, China)

**摘要:** 以 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 钎焊为研究对象,借助于扫描电镜和 X 衍射检测手段,研究了二硫化钼介质下时效焊点界面 IMC 组织结构特征及生长行为。实验结果表明:时效焊点界面 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 呈现由波浪状→扇贝状→层状的形成变化。焊点界面 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 的生长厚度与时效时间平方根呈线性关系, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 具有较小的生长激活能、较大的生长系数。添加 0.1% (质量分数) RE 时,界面 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 的生长激活能最大,分别为 81.74 kJ/mol 和 92.25 kJ/mol,对应焊点剪切强度最高。

**关键词:** Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE 钎料;焊点;时效;金属间化合物;生长

**中图分类号:** TG42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2010)10-0018-04

**Abstract:** The intermetallic compound (IMC) and its growing behavior of Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu solder joint were investigated in the mediator of molybdenum sulfide by means of scanning electronic microscope and X-ray diffraction during aging. The results show that the Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> morphology of solder joint interface can be changed from initial wavy-like to scallop-like, then to shape-layer. The thickness of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> and Cu<sub>3</sub>Sn IMC at the solder joint interface and the square root of aging time is coincidence with the liner relation, the growing activation energy of Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> is smaller and its coefficient of growth is larger than those of Cu<sub>3</sub>Sn. The shear strength of the solder joint is the highest with adding 0.1% (mass fraction) RE in the Sn2.5Ag0.7Cu solder alloys, and the Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> and Cu<sub>3</sub>Sn at solder joint interface have the largest growing activation energy which is separately 81.74 kJ/mol and 92.25 kJ/mol.

**Key words:** Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE solder; solder joint; aging; intermetallic compound; growing

随着人们环保意识的增强及电子产品向小型化、轻量化和多功能化的发展,开发出可以替代 SnPb 钎料且具有更高性能 of 无铅钎料,已成为表面组装用钎料研究的热点<sup>[1]</sup>。SnAgCu 系钎料合金作为 SnPb 钎料最有潜力的替代品之一,添加其他合金元素降低 Ag 含量以减少制造成本,是发展方向<sup>[1-3]</sup>。SnAgCuRE 系钎料合金及其焊点具有较好的综合性能,已成为我国独具特色的无铅钎料合金系。界面区金属间化合物 (IMC) 层作为构成焊点的重要区域,在服役过程中的行为直接影响着焊点的可靠性<sup>[4-6]</sup>。研究 SnAgCuRE 系钎料焊点在时效过程中界面区 IMC 行为,对开发我国独具特色的无铅钎料合金系有借鉴意义和指导作用。

迄今为止,人们已经研究了 SnPb 钎料在 Cu 基体上的界面反应及其时效焊点 IMC 的生长行为<sup>[6,7]</sup>,但有关低银 SnAgCuRE 系钎料合金焊点在服役过程中的界面 IMC 行为鲜见报道<sup>[2]</sup>。本工作以 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 钎焊焊点为研究对象,借助于扫描电镜 (SEM) 和 X 衍射等现代理化检测手段,研究了二硫化钼介质下时效焊点界面 IMC 组织结构特征及生长行为。

## 1 实验材料及方法

在非自耗电炉 ZHW-600A 中制备实验用

Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE 钎料合金。钎焊接头采用搭接接头,试样尺寸如图 1 所示。钎焊母材为紫铜板,钎剂采用 22% ZnCl<sub>2</sub>+ 2% NH<sub>4</sub>Cl 水溶液,炉中钎焊。

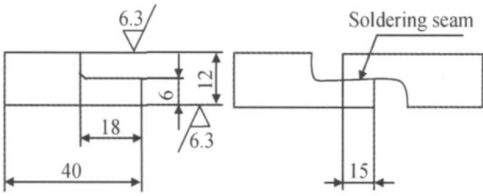


图 1 钎焊试样尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Specimen size of solder joint (unit: mm)

为保证时效实验不受氧化等问题的干扰,钎焊后时效实验在 85, 125, 150℃的二硫化钼气氛中进行,时效时间取 50, 100, 200, 500h。将时效焊点沿纵向剖开,用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀,用 JSM-5610LV 扫描电镜(SEM)观察时效过程中 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 焊点界面区 IMC 组织形貌特征,采用 AutoCAD 软件计算界面区 IMC 层的总面积以获取相应的 IMC 层平均厚度。时效焊点剪切实验在 AG-I 250 kN 万能材料试验机上沿平行于钎缝方向进行室温拉伸完成,拉伸

速率为 1mm/min。为确定时效焊点界面区的相结构,在焊点中截取 4mm × 10mm × 2mm 的试样,在 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪上进行物相分析,X 衍射实验示意图如图 2 所示,其中加速电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描范围为 12~ 90°。

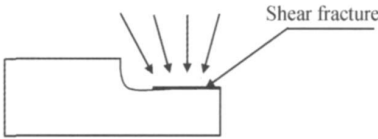


图 2 剪切断口的 X 射线衍射实验示意图

Fig. 2 Scheme of X-ray diffraction test for shear fracture

2 结果与讨论

2.1 时效焊点接头区组织

图 3 是 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 时效焊点接头区显微组织及界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 颗粒表面形貌。由图 3 可见,焊点接头区由 Cu 基体、界面区和钎缝三部分组成。

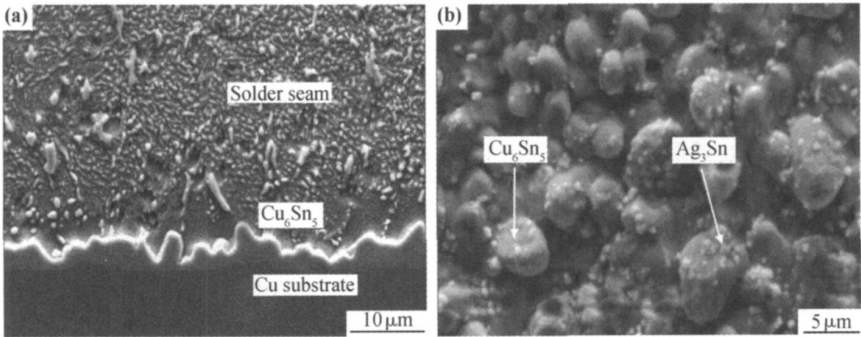


图 3 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 时效焊点界面区 SEM 照片

(a) 钎焊接头; (b) 界面区横截面表面组织形貌

Fig. 3 SEM photograph of interfacial zone of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu solder joint at aging

(a) solder joint; (b) the surface morphology of the interfacial zone at cross section

钎缝组织包括初生相 β-Sn 和共晶组织。共晶组织包括颗粒状 β-Sn+ Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>、针状 β-Sn+ Ag<sub>3</sub>Sn 二元共晶组织和 β-Sn+ Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>+ Ag<sub>3</sub>Sn 三元共晶组织。随着时效时间的延长,钎缝原子发生了扩散、溶解,Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 相由较大棒状向圆形或椭圆形转变,针状 Ag<sub>3</sub>Sn 相形态变化不明显,二者均呈弥散分布。

图 4 为 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 时效焊点的 XRD 衍射图谱,结合断口能谱分析结果,界面区 IMC 主要由 Cu<sub>3</sub>Sn 和 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 组成。Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 分布在靠近钎缝一侧,呈波浪状形态颜色较浅,厚度在几个微米;界

面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 颗粒表面形貌多为圆形,其表面上有纳米级的 Ag<sub>3</sub>Sn 颗粒,如图 3(b) 所示。Cu<sub>3</sub>Sn 分布在靠近 Cu 基体一侧,厚度较薄颜色较深,不易被观察到。与焊后接头界面区的 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 相比,时效后焊点界面区的 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 厚度有所增加,其原因是长时间时效过程中焊点近钎缝侧的 Sn 原子与基体中 Cu 原子相互扩散所致。

2.2 时效焊点界面区 IMC 生长动力学

2.2.1 界面区 IMC 生长行为

钎焊时,熔融钎料与基体 Cu 反应直接生成波浪

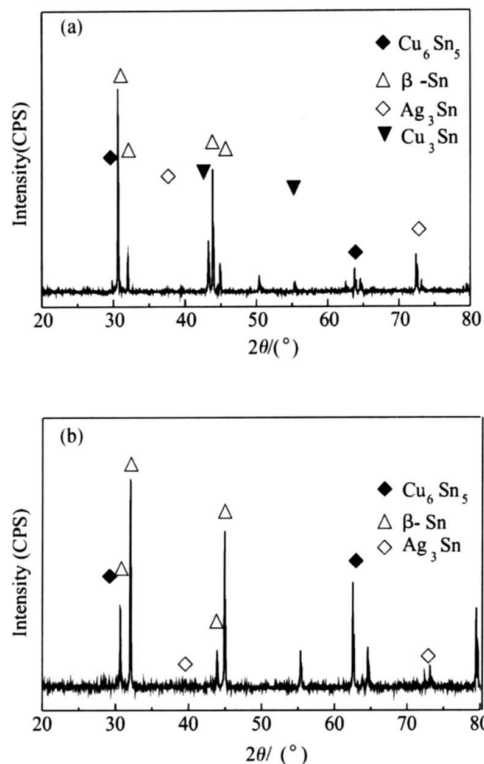


图4 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 焊点 XRD 图谱

(a) 时效后; (b) 钎料合金

Fig. 4 XRD pattern of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu solder joint

(a) after aging; (b) soldering alloy

状  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC, 在界面区近钎缝侧形成波浪状  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC, 这有利于 Cu, Sn 原子扩散发生界面反应<sup>[1]</sup>。由于 Sn 原子的持续扩散受阻而使 Cu 原子过剩, 使界面区近基体 Cu 一侧形成薄层状  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC。对于稀土含量较高 ( $\text{RE} > 0.5\%$ ) 的 Sn2.5Ag0.7Cu $x$ RE/Cu 焊点, 界面区还可观察到 Kirkendall 孔洞, 这会影响焊点的性能。

伴随着长时间的时效, 焊点界面区发生了 Cu, Sn 原子互扩散, 相应地界面区 IMC 组织结构形态也发生了如下变化:

(1)  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 形态变化不大; 在较高温度时效时, 界面  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 呈现明显的由波浪状→扇贝状→层状形态的变化。

(2)  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 呈不同程度生长,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 生长速度明显高于  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 的。图 5 是  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 层厚度与时效时间的关系曲线, 图中每个点为界面三个不同区域 IMC 厚度的平均值。从图 5 可见,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 层生长厚度与时效时间的平方根呈线性关系, 可用公式 (1) 表述, 这表明 Sn2.5Ag0.7Cu $x$ RE/Cu 时效焊点界面区  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 的生长受扩散机制控制;  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 层生长系数  $K$  大于  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 层, 即

$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 生长速度明显高于  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 的。这是由于在钎焊时界面区已形成一定厚度连续致密的  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC, 时效时近钎缝一侧的 Sn 原子很难穿越界面区  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 层而扩散到 Cu 基体一侧, 从而明显延缓  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 生长;  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 层生长系数均随时效温度升高而增大, 如 85℃ 比 150℃ 时效时生长系数小 1~2 个数量级, 这与文献 [8] 研究结果相一致的。赫虎等人<sup>[9]</sup>指出, SnAgCuRE 系钎料合金中 RE 的包覆作用有利于抑制界面区 IMC 的增长速率。研究表明, 添加 0.1% RE 的 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 时效焊点界面区  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 生长速度较 Sn2.5Ag0.7Cu/Cu 焊点的慢。

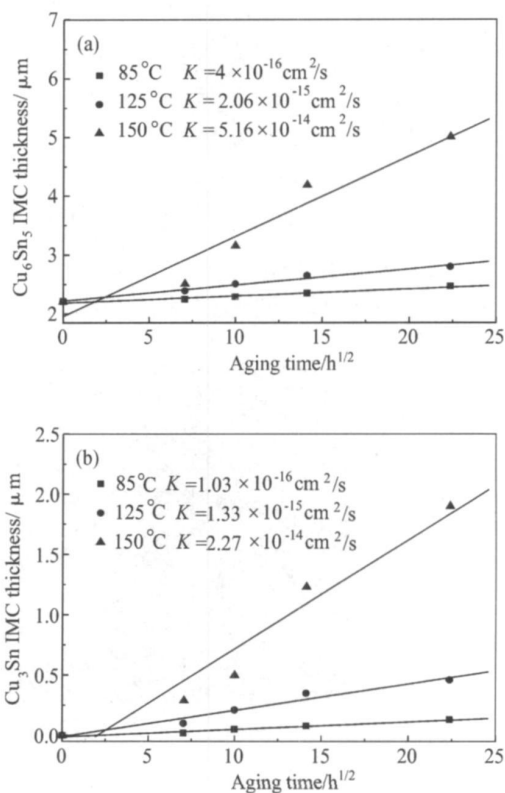


图5 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 界面 IMC 厚度与时效时间关系

(a)  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  金属间化合物; (b)  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  金属间化合物

Fig. 5 Relationship curve between the interfacial IMCs thickness

of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu solder joint and aging time

(a)  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC; (b)  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC

$$X = X_0 + \sqrt{Kt} \quad (1)$$

式中:  $X$  是时效过程中 IMC 层厚度 (cm);  $X_0$  是时效前 IMC 层厚度 (cm);  $K$  是 IMC 层生长系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $t$  是时效时间 (s)。

时效过程中焊点界面区 IMC 组织形态结构的变化势必会影响其焊点性能。图 6 为时效时间对 Sn2.5Ag0.7Cu $x$ RE/Cu 焊点剪切强度的影响。从图

6 可见, 焊点剪切强度由时效初的快速降低渐趋于平缓。这反映界面区 IMC 生长尤其是 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 生长较快对焊点可靠性不利。比较而言, 添加 0.1% RE 的 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 焊点界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 生长速度较慢, 具有较高的焊点剪切强度。同样, 随时效温度升高, 焊点剪切强度下降。随时效时间延长和时效温度升高, 剪切断口也由韧性断裂逐渐向韧性+脆性断裂相结合的方式转变。时效温度对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 焊点剪切断口形貌的影响见图 7。由图 7 可见, 时效温度升高, 剪切断口中韧窝明显减少, 剪切断口由韧性断裂向韧性+脆性断裂相结合的断裂方式转变。

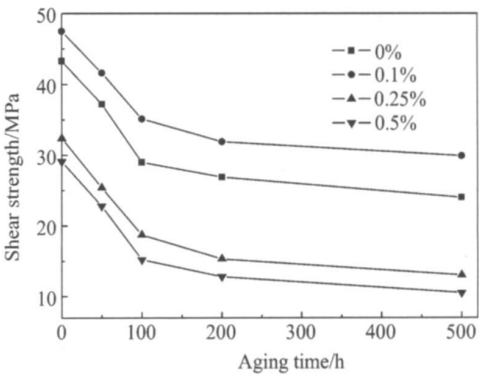


图 6 时效时间对 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 焊点剪切强度影响

Fig. 6 Effect of aging time on the shear strength of Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu solder joint

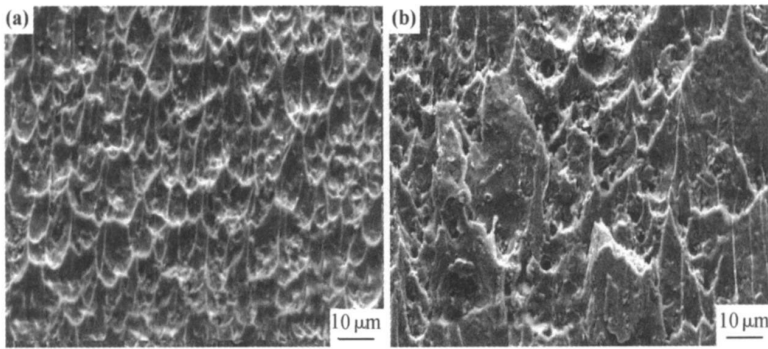


图 7 时效温度对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 焊点剪切断口影响  
(a) 85 °C, 200h; (b) 125 °C, 200h

Fig. 7 Effect of aging temperature on the shear strength of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu solder joint  
(a) 85 °C, 200h; (b) 125 °C, 200h

2.2.2 界面区 IMC 生长激活能

时效过程中 Sn, Cu 原子的互扩散导致焊点界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 的生长。焊点界面 IMC 的结构形态与其可靠性密切相关。为研究时效焊点界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 的生长情况, 引入了 IMC 生长激活能概念, 具体由 Arrhenius 关系式<sup>[10]</sup>确定。

$$K = A \exp(-Q/RT) \tag{2}$$

式中:  $K$  是焊点界面区 IMC 生长系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $A$  是界面区 IMC 生长常数( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $Q$  是界面区 IMC 生长激活能( $\text{kJ/mol}$ );  $R$  是理想气体常数( $\text{kJ/mol}$ );  $T$  是绝对温度( $\text{K}$ )。

将公式(2)两边取对数,  $Q$  值可由  $\ln(K)-1/T$  曲线斜率求得, Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE 的 Arrhenius 曲线见图 8 所示。

由图 8 可见, 对于 Sn2.5Ag0.7Cu<sub>x</sub>RE/Cu 时效焊点, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>IMC 具有较小的生长激活能, 这表明在时效过程中焊点界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>IMC 具有较大的生长系数, 更易长大, 厚度较大。当时效焊点界面区

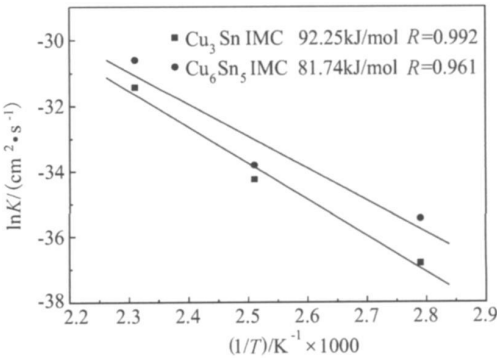


图 8 lnK 与 1/T 曲线  
Fig. 8 Curve between lnK and 1/T

Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>IMC 较厚时, 其相应的剪切强度不高。这说明在时效过程中界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC 结构形态对焊点可靠性影响更大。进一步研究表明, 当 RE 添加量为 0.1% 时, 焊点界面区 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 和 Cu<sub>3</sub>Sn IMC 生长激活能最大, 分别为 81.74kJ/mol 和 92.25kJ/mol, 对应的  
(下转第 37 页)

## 参考文献

- [1] KIM D U, NISHIMOTO K. Creep rupture and fatigue properties of transient liquid phase bonded joints of Ni base single crystal superalloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19: 456–460.
- [2] NISHIMOTO K, SAIDA K, KIM D, et al. Bonding phenomena and joint properties of transient liquid phase bonding of Ni-base single crystal superalloys [J]. *Welding Research Abroad*, 1998, 44 (11): 48–58.
- [3] NISHIMOTO K, SAIDA K, KIM D, et al. Single-crystallization behavior in TLP-bonded interlayer-transient liquid phase bonding of Ni-base single crystal superalloy [J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 1998, 16(4): 530–539.
- [4] 毛唯, 李晓红, 周媛, 等. DD3 单晶合金 TLP 扩散焊接头的高温拉伸性能和持久性能 [J]. *焊接*, 2008, (3): 28–31.
- [5] LI X H, MAO W, GUO W L, et al. Transient liquid phase diffusion bonding of a single crystal superalloy DD6 [J]. *China Welding*, 2005, 14(1): 19–23.
- [6] LIU J D, JIN T, LI W, et al. Creep fracture mechanism of TLP joint of a Ni-base single crystal superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 457: 185–190.
- [7] LI W, JIN T, SUN X F. Transient liquid phase bonding of Ni-base single crystal superalloy [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2002, 18(1): 54–56.
- [8] LI W, JIN T, SUN X F, et al. Study of Ni-Cr-C-W-Mo-B inter-layer alloy and its bonding behaviour for a Ni-base single crystal superalloy [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48: 1283–1288.
- [9] 王春涛, 田素贵, 王明昱, 等. 一种单晶镍基合金热处理期间的组织演化与分析 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(1): 46–49.
- [10] 肖纪美. 合金相与相变[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 308–309.

收稿日期: 2010-06-20; 修订日期: 2010-07-26

作者简介: 郎波(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事摩擦焊、TLP 扩散焊的研究工作, 联系地址: 北京 340 信箱 北京航空制造工程研究所 102 室(100024), E-mail: langbo198009@163.com

(上接第 21 页)

焊点剪切强度最高, 这反映添加 0.1% RE 时能够抑制界面区  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 尤其是  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 的生长, 能有效改善时效焊点的可靠性。这一研究结果对改善和提高  $\text{SnAgCuRE}$  系无铅焊点的可靠性有借鉴意义和指导作用。

### 3 结论

(1)  $\text{Sn}_{2.5}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}_x\text{RE}/\text{Cu}$  时效焊点界面  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 呈现由波浪状→扇贝状→层状的形态变化, 界面  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 的生长厚度与时效时间平方根呈线性关系。

(2)  $\text{Sn}_{2.5}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}_x\text{RE}/\text{Cu}$  时效焊点  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  IMC 具有较小的生长激活能、较大的生长系数。添加 0.1% RE 时, 界面  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  IMC 的生长激活能最大, 分别为 81.74 kJ/mol 和 92.25 kJ/mol, 对应的焊点剪切强度最高。

(3) 随时效时间延长和时效温度升高, 焊点剪切断口由韧性断裂向韧性+脆性断裂方式转变。

## 参考文献

- [1] SUGANUMA K. 无铅焊接技术[M]. 宁晓山, 译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 张柯柯, 王要利, 樊艳丽, 等. 微量 RE 及环境条件对  $\text{SnAgCu}$  钎焊接头蠕变断裂寿命的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(8): 1473–1476.

[3] 张柯柯. 特种先进连接方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.

[4] VIANCO P T, REJENT J A. Solid-state intermetallic compound layer growth between copper and  $\text{Sn}_{3.9}\text{Ag}_{0.6}\text{Cu}$  solder [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(9): 990–1004.

[5] MA X, WANG F J, QIAN Y Y, et al. Development of Cu-Sb intermetallic compound at Pb-free solder/Cu joint interface [J]. *Materials Letters*, 2003, 57: 3361–3365.

[6] 王烨, 黄继华, 张建刚, 等.  $\text{Sn}_{3.5}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}/\text{Cu}$  界面的显微结构 [J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(3): 495–499.

[7] LEE Y G, DUH J G. Characterizing the formation and growth of intermetallic compound in the solder joint [J]. *Materials Science*, 1998, 33(23): 5569–5572.

[8] 程从前, 赵杰, 杨朋, 等.  $\text{Sn}_{3.9}\text{Ag}/\text{Cu}$  焊点在钎焊和时效中 IMC 的生长和晶体取向分析 [J]. *材料热处理学报*, 2006, 27(4): 82–86.

[9] 赫虎, 田君, 史耀武, 等.  $\text{SnAgCuY}$  钎料高温时效过程中的显微组织演化 [J]. *电子元件与材料*, 2006, 25(2): 52–54.

[10] VIANCO P T, HLAVA P F, KILGO A C. Intermetallic compound layer formation between copper and hot-dipped 100In, 50In50Sn, and 63Sn37Pb coatings [J]. *Electronic Materials*, 1994, 23(7): 583–594.

基金项目: 河南省杰出青年科学基金(074100510011); 河南省高校杰出科研人才创新工程项目(2004KYCX020)

收稿日期: 2010-06-27; 修订日期: 2010-07-20

作者简介: 张柯柯(1965—), 男, 博士, 教授, 副院长, 主要从事特种连接技术及新材料连接、微连接用无铅钎料等方面的研究工作, 联系地址: 河南洛阳市涧西区西苑路 48 号 河南科技大学材料科学与工程学院 (471003), E-mail: zhkekekd@163.com