



苛刻热循环对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊界面及接头性能的影响

郭兴东^{1,2}, 张柯柯^{1,2}, 邱然锋¹, 石红信¹, 王要利¹, 马 宁¹

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023;

2. 河南科技大学 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 洛阳 471023)

摘 要: 采用 SEM、EDS、XRD 等对苛刻热循环下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊界面 IMC 及接头性能进行研究。结果表明: 苛刻热循环下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊界面 IMC 由(Cu,Ni)₆Sn₅ 和 Cu₃Sn 相组成; 随热循环周期的增加, 钎焊接头的界面 IMC (Cu,Ni)₆Sn₅ 形态由波浪状转变为局部较大尺寸的“笋状”, IMC 平均厚度和粗糙度增大, 相应接头剪切强度降低。添加适量 Ni 0.05%(质量分数)的钎焊接头界面 IMC 平均厚度和粗糙度最低, 接头剪切强度最高。在 100 热循环周期内, 随热循环周期增加, Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断面由呈现钎缝处的韧性断裂向由钎缝和 IMC 层组成以韧性为主的韧-脆混合断裂转变。

关键词: 无铅钎料; 苛刻热循环; 接头; 金属间化合物; 性能

中图分类号: TG425

文献标志码: A

随着人们环保意识的增强, 电子信息产品无铅化已成为其发展的必然趋势^[1-2]。Sn-Ag-Cu 系钎料合金因其较好的润湿性和综合性能, 被认为是 Sn-Pb 系钎料的最佳替代品之一^[3-4], 并成功地开发出微电子连接商用 Sn3.8Ag0.7Cu 无铅钎料, 我国开发出独具特色的 Sn-Ag-Cu-RE 系无铅钎料合金。为进一步降低无铅钎料的制造成本, 人们在保证无铅钎料具有良好润湿性的同时, 借助于合金化方法降银并提高钎料合金的强韧性, 以获得具有较高可靠性的焊点, 如我国开发出低银高强韧 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi 钎料合金, 其中蠕变寿命是目前商用 Sn3.8Ag0.7Cu 无铅钎料的两倍多, 呈现出显著的技术经济优势。但迄今为止, 关于微电子连接用 Sn-Ag-Cu-RE-Ni 系无铅钎料合金焊点可靠性尤其在航空、军工等苛刻环境下焊点可靠性研究却鲜见文献报道。因此, 本文作者拟对苛刻热循环下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊界面 IMC 及接头性能进行研究, 为新型微电子连接用高强韧高可靠性无铅钎料的设计开发提供实验依据。

1 实验

1.1 实验材料

采用 99.9%以上纯度的 Sn、Ag、Cu、Ni 及富含 Ce 和 La 的混合 RE, 在真空度为 5×10^{-3} Pa 的非自耗电炉(ZHW-600A 型)中先制备 Cu-RE 中间合金, 再取一定量的中间合金与 Sn、Ag、Cu、Ni 制备实验用 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi($x=0, 0.05, 0.1$, 质量分数, %)钎料合金; 母材选用纯度为 99.9%的紫铜板; 焊剂为商用 CX600 水洗钎剂。

1.2 实验方法及条件

将制备的钎料合金轧制成 $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 的薄带, 在自行研制的箱式钎焊炉内进行搭接钎焊试验, 试样形状尺寸如图 1 所示。参照文献[5]选用钎焊工艺参数: 钎焊温度 270 °C, 钎焊时间 240 s。焊后在 SM-KS-50-CC 型微连接接头可程式快速温变试

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFR50820); 国家自然科学基金资助项目(U1604132); 河南省科技创新杰出人才计划(154200510022)

收稿日期: 2015-12-04; **修订日期:** 2016-04-20

通信作者: 张柯柯, 教授, 博士; 电话: 13837942173; E-mail: zhkeked@163.com

试验箱中进行接头热循环试验,其热循环试验参数如下:极限温度-40~125 ℃,升降温速率 15 ℃/min,高低温各保温 10 min,循环周期数为 0、20、50、60、80、100。热循环试验后的钎焊试样经打磨、抛光后 4%(体积分数)硝酸酒精溶液腐蚀,用 JSM-5610LV 型扫描电镜观察接头组织形貌,必要时进行 EDS 能谱成分分析;钎焊后采用尺寸为 8 mm×70 mm×4 mm 剪切试样,在 AG-I250kN 型万能试验机上室温条件下进行拉伸,拉伸速度为 1 mm/min,借助于 D8 ADVANCE 型 X 衍射仪对钎焊接头界面进行物相分析。为保证剪切强度接头测试结果的准确性,取 5 个不同试样的算术平均值作为剪切强度值。

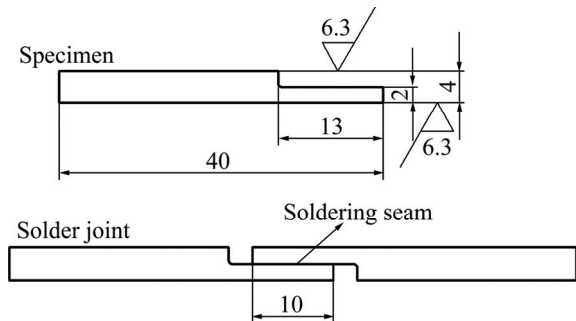


图 1 钎焊试样形状及尺寸
Fig. 1 Configuration and dimension of specimen for soldering (Unit: mm)

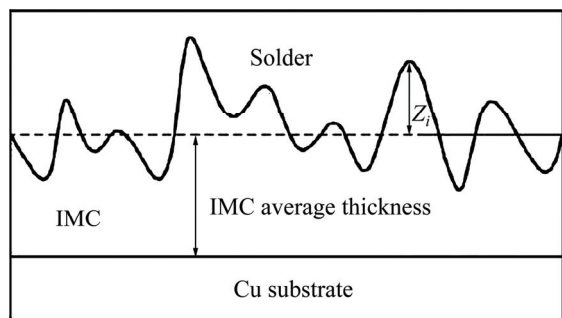


图 2 接头界面粗糙度示意图
Fig. 2 Schematic diagram of roughness of solder joints

参照文献[6]中关于微连接焊点界面厚度、粗糙度的评估方法(界面 IMC 粗糙度测量示意图见图 2),利用 AutoCAD 软件测量观察界面 IMC 面积,根据等积法原理求得界面 IMC 的平均厚度。以平均厚度线作为粗糙度测量基准线(见图 2 中虚线),测量选定区域界面 IMC 的峰值到基准线间的距离,代入式(1)计算选定区域的界面粗糙度。为减小测量误差,以 5 次随机测量区域的平均值作为测量结果。

$$R_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Z_i^2}{N}} \quad (1)$$

式中: R_{rms} 为粗糙度, μm ; N 为选定区域测量点的个数; Z_i 为所测量选定区域的 IMC 峰值到测量基准线间的距离, μm 。

2 结果与分析

无铅钎焊接头界面区 IMC 层在服役环境中的成长及其形态与接头可靠性密切相关。因此,有必要研究苛刻热循环下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊接头界面 IMC 的生长行为、接头性能及其断裂机制。

2.1 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 苛刻热循环钎焊接头界面金属间化合物

图 3 所示为 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 苛刻热循环接头界面 SEM 像和 XRD 谱,钎焊接头界面金属间化合物(见图 3(a)中 A、B 点)EDS 分析结果如表 1 所列。由图 3 和表 1 可知,钎焊接头由钎缝、界面区和母材 3 部分组成。钎缝由初生相 $\beta\text{-Sn}$ 和共晶组织组成,其共晶组织包括颗粒状 $\beta\text{-Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 、针状 $\beta\text{-Sn}+\text{Ag}_3\text{Sn}$ 二元共晶组织以及 $\beta\text{-Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5+\text{Ag}_3\text{Sn}$ 三元共晶组织^[7]。接头界面 IMC 形成于钎缝和 Cu 基体之间,分为两层:一层为靠近钎缝侧颜色较浅的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ (见图 3(a)中 A),向钎缝内不规则生长,厚度一般 4~5.5 μm ;一层为靠近 Cu 基体侧平且颜色较深厚度小于 1 μm 的 Cu_3Sn ^[8](见图 3(a)中 B)。Ni 和 Cu 具有相同的晶体结构,钎料熔化过程中 Ni 原子置换出 Cu_6Sn_5 中部分 Cu 形成了 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相^[9]。界面 IMC 层中 Cu_3Sn 相生成量较少,可能是由于 Cu_6Sn_5 相的生长驱动力高于 Cu_3Sn 相^[10]和 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 抑制 Cu_3Sn 相的生长驱动力。接头界面处 IMC 内存在少量气孔、裂纹等缺陷。无铅焊点界面 IMC 作为连接的基础,其几何形态、尺寸与微连接焊点可靠性密切相关^[11],在此,重点考虑苛刻热循环对接头界面界面金属间化合物尤其是 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 的影响。

表 1 图 3(a)中焊点界面 EDS 分析结果
Table 1 EDS results of solder joint interface shown in Fig. 3(a)

Point	Mole fraction/%		
	Sn	Cu	Ni
A	45.22	52.13	2.65
B	25.27	74.43	—

图 4 所示为苛刻热循环对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE_xNi/Cu 接头界面 IMC 的影响。由图 4 可知, 低热循环周期下接头界面 IMC 成长较慢, 波浪状 IMC 形态均匀, 无裂纹、空洞等缺陷(见图 4(a)); 当循环周期大于 50 周时, 界面化合物 IMC 生长加快, 局部出现较大尺寸的“笋状”, 甚至产生空洞等现象(见图 4(b))。随着热循环周期数增加, 接头界面 IMC 层逐渐变厚, 界面中(Cu, Ni)₆Sn₅ 相逐步长大并粗化, 生长前沿部分不断向钎缝内部不规则长大。由于界面金属间化合物

和钎缝热膨胀系数不相同, 在接头应力作用下界面产生显微裂纹、空洞等(见图 4(c)和(d))。对比图 4 可知, 热循环过程接头遭受高低温循环作用, 导致接头界面金属间化合物粗化, 在接头应力循环作用下产生开裂失效等。热循环初期, 界面处连续致密的(Cu, Ni)₆Sn₅ 相阻碍了钎缝中 Sn、Ni 原子与基板上 Cu 原子间的相互扩散, 抑制了界面 Cu₃Sn 金属间化合物的生长, 形成了薄且平的形貌特征。热循环 50 周期以后, 界面化合物生长速率有所加快, 一方面可能是由于界

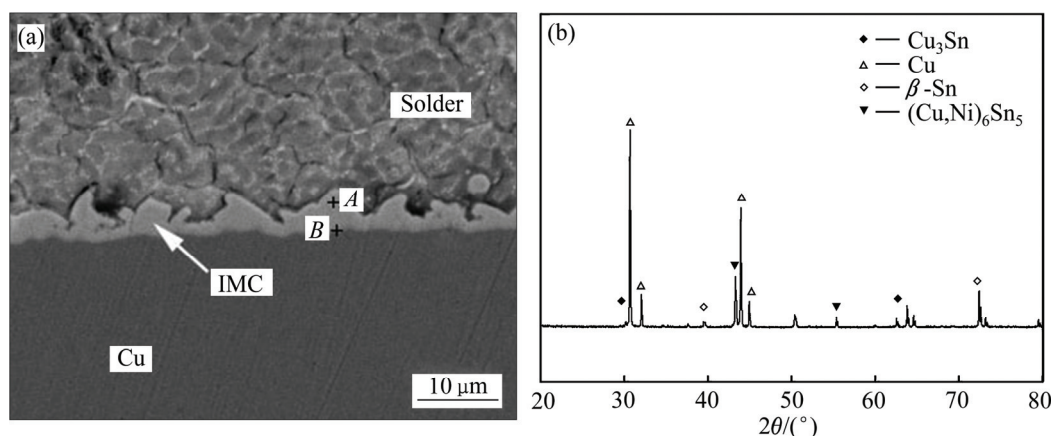


图 3 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 接头界面 SEM 像及 XRD 分析结果

Fig. 3 SEM image and XRD results of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joint interface: (a) SEM image; (b) XRD pattern

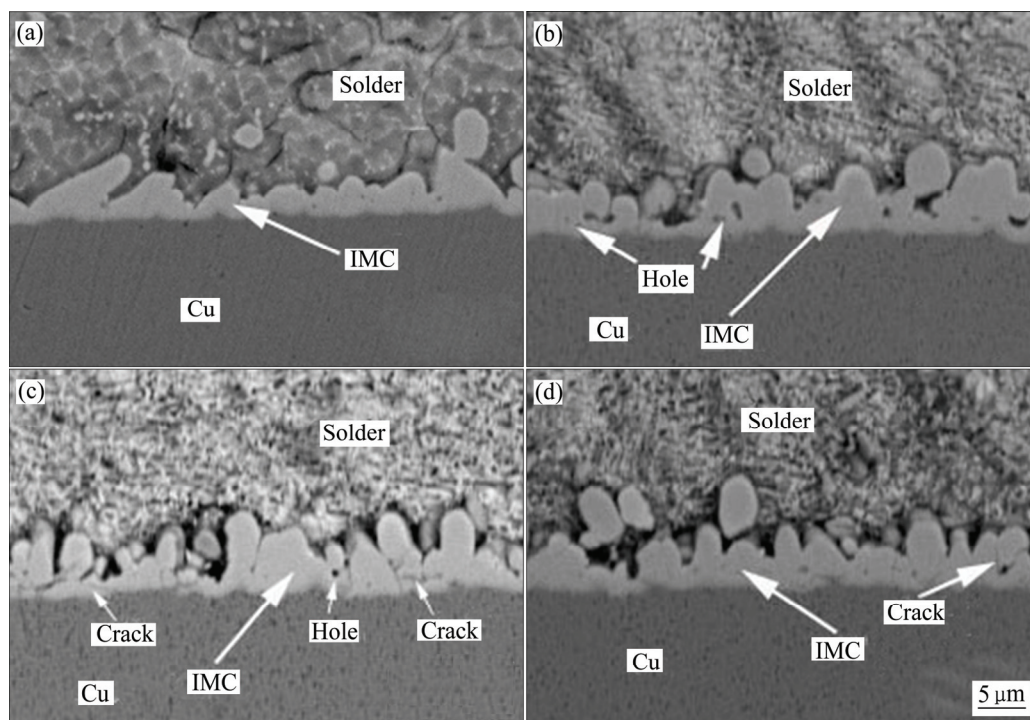


图 4 苛刻热循环对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 接头界面 IMC 的影响

Fig. 4 SEM images of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joint interface in different thermal cycling: (a) 0 cycle; (b) 50 cycles; (c) 80 cycles; (d) 100 cycles

面处扇贝状 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 之间的凹槽是 Cu 原子向 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 颗粒与钎料界面处扩散的快速通道, Cu 原子通过凹槽快速扩散至扇贝状颗粒与钎料界面处与 Sn、Ni 原子发生反应; 另一方面可能是由于钎料在热循环条件下发生了动态再结晶, 促使钎料中的 Sn、Ni 原子快速扩散至钎料/ $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 界面处与 Cu 原子发生反应, 从而加快了界面化合物的生长^[12]。

苛刻热循环对 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}(x=0, 0.05, 0.1, \%)$ 接头界面粗糙度及 IMC 层的平均厚度影响如图 5 所示。由图 5 可见, 钎焊点界面金属间化合物平均厚度一般为 3~5 μm ; 随热循环周期次数的增加, 界面 IMC 层的平均厚度及粗糙度不断增加; $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05-Ni/Cu}$ 钎焊接头界面粗糙度及 IMC 层的平均厚度明显低于不添加 Ni 和添加 0.1%Ni(质量分数)的 $\text{Sn2.5Ag-0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 钎焊

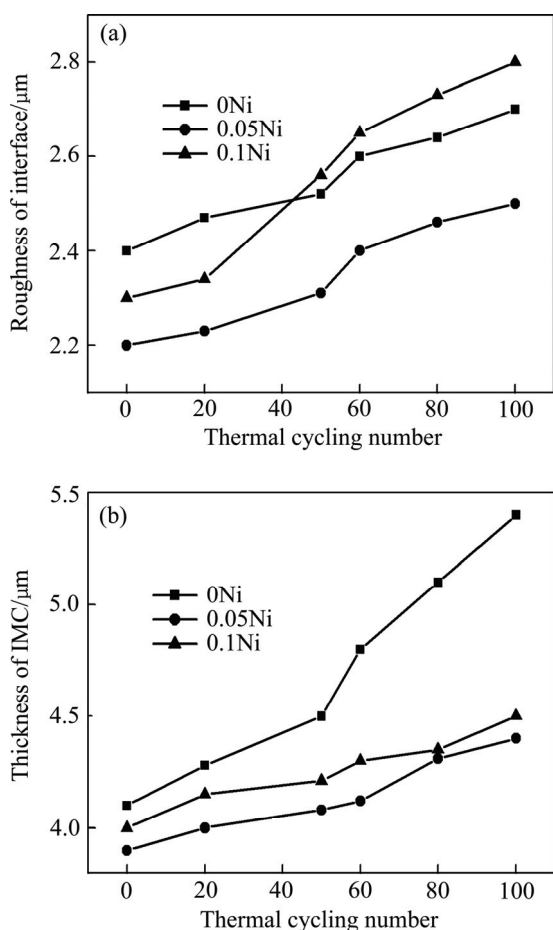


图 5 不同热循环周期下 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}(x=0, 0.05, 0.1, \%)$ 接头界面粗糙度及 IMC 层的平均厚度

Fig. 5 Roughness and IMC average thickness of $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ ($x=0, 0.05, 0.1, \%$) solder joint interface in different thermal cycling: (a) Roughness; (b) IMC average thickness

接头的, 这表明适量添加 Ni 能够抑制苛刻热循环条件下 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 钎焊接头界面 IMC 的生长、降低界面粗糙度, 改善接头组织形态。这可能是由于添加的 Ni 在 Sn 基焊料中的溶解度小, Ni-Sn 金属间化合物反应生成速率小, 添加适量的 Ni 增加了界面元素的扩散阻力, 降低了钎焊界面 IMC 的生成速率, 抑制了 IMC 的快速长大^[1]。

2.2 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 苛刻热循环下钎焊接头性能

苛刻热循环下 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 接头剪切强度如图 6 所示。由图 6 可知, 随苛刻热循环周期的增加, $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 接头剪切强度下降; 添加适量的 Ni 能抑制苛刻热循环钎焊接头剪切强度的降低。在低热循环周期即热循环小于 50 周时, 钎焊接头剪切强度下降幅度较小; 当热循环大于 50 周时, 钎焊接头剪切强度呈快速下降。这与无铅焊点界面区 IMC 的成长及其形态与接头可靠性密切相关研究结果吻合, 由图 4 和 5 可知, 苛刻热循环对 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 接头界面 IMC 的影响可见, 随热循环周期的增加, 接头界面 IMC 层平均厚度和界面粗糙度增大, 接头剪切强度降低; 添加适量 Ni(0.05%)IMC 层平均厚度和界面粗糙度增大最低, 其接头剪切强度最高。

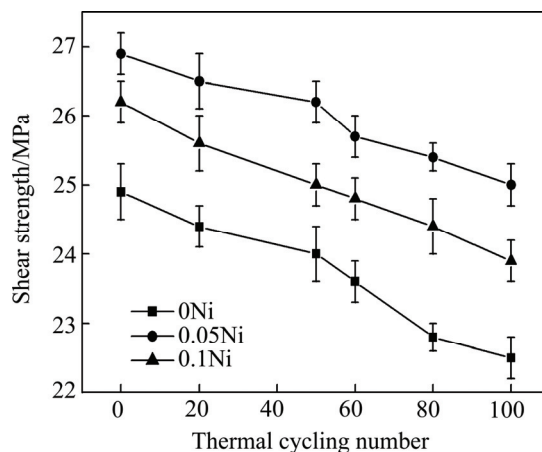


图 6 苛刻热循环对 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 接头剪切强度影响

Fig. 6 Shear strength of $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}(x=0, 0.05, 0.1, \%)$ solder joint in different thermal cycling

苛刻热循环下 $\text{Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu}$ 接头剪切断面 SEM 像如图 7 所示。从图 7 可见, 经 100 热循环周期后(见图 7(d)); A 点成分以 Sn 元素为主, 属钎缝区域(见图 7(e)); B 点成分反映其为界面 IMC 层

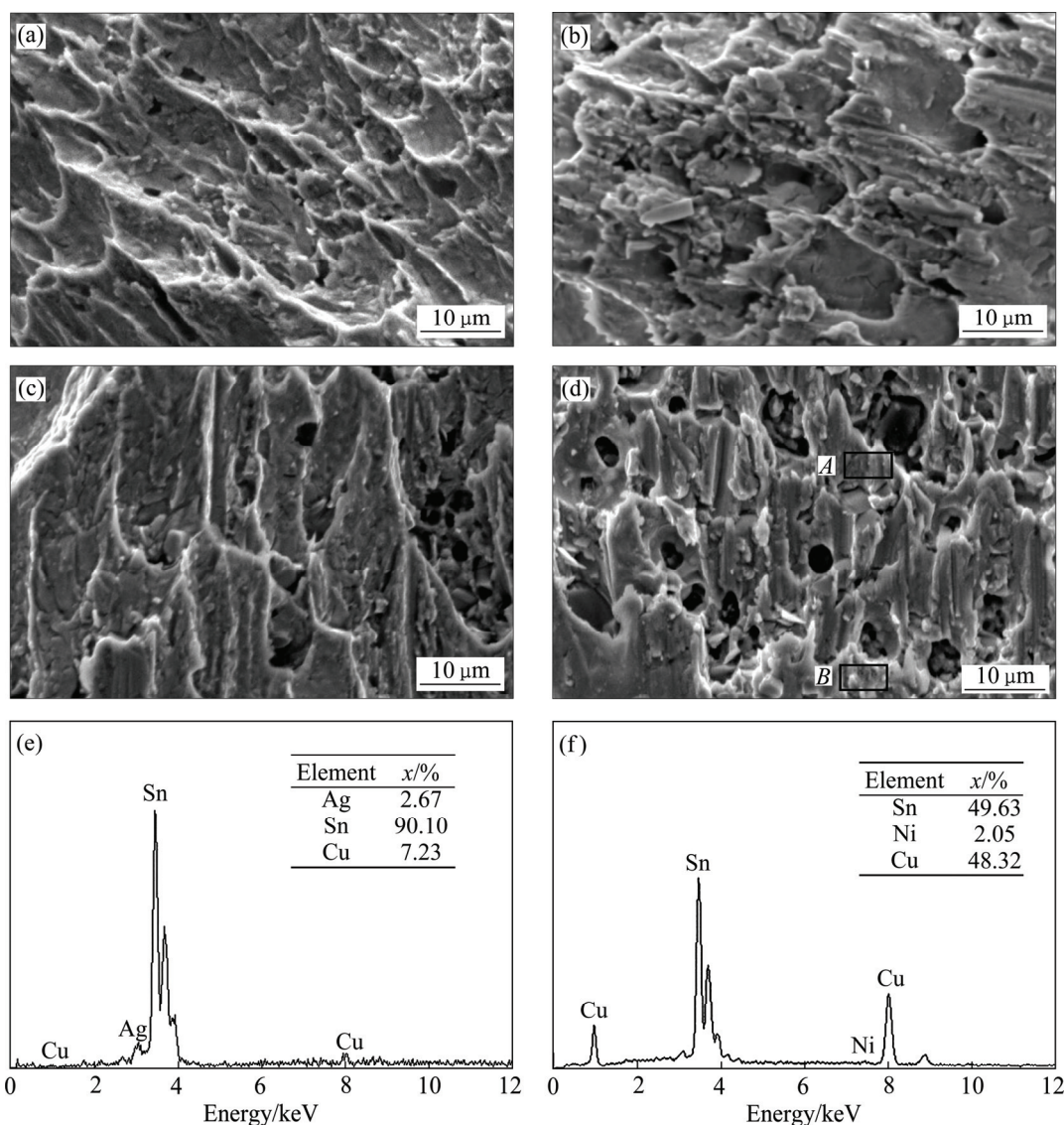


图 7 不同热循环周期下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 接头剪切断口 SEM 像及 A、B 点成分分析结果

Fig. 7 SEM images of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joint shear fracture in different thermal cycling and EDS results of points A and B: (a) 0 cycle; (b) 50 cycles; (c) 80 cycles; (d) 100 cycles; (e) EDS results of point A; (f) EDS results of point B

(Cu, Ni)₆Sn₅(见图 7(f)), 这表明苛刻热循环钎焊接头断裂部分发生在钎缝内、部分发生在界面 IMC 层。在 0~100 热循环周期, Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断口均有一定的抛物线韧窝, 这是由于钎焊接头受剪切力作用时, 钎缝和界面区发生塑性变形, 组织显微裂纹等缺陷会导致显微空穴的形成, 在变形量增大时, 空穴聚集长大, 并最终相互连通形成在断口上呈现出剪切韧窝断裂特征。随着热循环周期的增加, 剪切断口中发生在焊缝中蜂窝状韧窝断口呈韧性断裂减少, 断口中短而平的断裂小刻面增多, 该断裂更多是发生在接头界面的 IMC 层如(Cu, Ni)₆Sn₅中, 且刻面周围存在明显的撕裂棱, 断口呈脆性断裂特征。经热循环 100 周期后, 接头在 IMC 层与钎缝的

结合面发生断裂, 断口上观察到山峰状韧窝及部分撕裂棱, 韧窝数量减少, 尺寸变大, 深度变浅, 甚至出现层片状光滑的脆断区。这表明随着热循环周期的增加断口呈韧性断裂逐渐向以韧性为主的韧-脆混合断裂转变。

2.3 分析与讨论

Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊接头经不同苛刻热循环, 接头受不均匀热、力作用会导致界面区组织不规则成长。界面化合物 IMC 的生长主要依靠原子扩散进行^[13]。在热循环条件下 Cu 原子通过晶界、位错、空位、缺陷等穿过界面 IMC 与钎料基体中界面处的 Sn 原子进行反应生成(Cu, Ni)₆Sn₅层, 使(Cu, Ni)₆Sn₅

层明显加厚^[14],局部的快速生长使得出现界面 IMC “笋状”^[15],界面 IMC 的形态由波浪状演变为局部较大尺寸的“笋状”,导致界面 IMC 厚度及粗糙度不断增加。无铅焊点界面 IMC 属于硬脆相,影响着接头区组织性能的连续性,其形态、尺寸的改变势必降低钎焊接头的强度和韧性并最终影响接头可靠性。接头在热循环作用下,一定程度上导致钎缝组织的粗化,界面 IMC 尺寸变大、形态粗化,这使钎焊接头的性能及可靠性降低。在接头热循环作用下,钎焊接头断面上韧窝数量逐渐减少,出现撕裂棱甚至层片状光滑的脆断区,表现出接头断口由韧性断裂向以韧性为主的韧-脆混合断裂特征的转变,使接头可靠性降低。因此,应寻求减少界面 IMC 成长的有效途径以改善钎焊接头的可靠性。

Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE 钎料合金中添加适量 Ni,可以细化组织、改善钎料润湿性及性能^[16]。Ni 晶格点阵与 Cu 的相近,原子序数也与 Cu 的相近,在实际的电子封装及焊后的服役条件下,Ni 晶格起到结晶核心的作用,可以减小焊点界面 IMC 的晶粒尺寸。由于 Ni 在 Sn 基焊料中的溶解度小,Ni-Sn 金属间化合物反应生成速率小,添加适量的 Ni 能增加界面元素的扩散阻力,从而抑制热循环过程中接头界面 IMC 的过快生长,减缓热循环过程中剪切强度的降低,进而提高接头的可靠性。鉴于 Ni 元素能够抑制界面 IMC 快速生长,因此,可以向钎料合金中加入适量的 Ni 来提高钎焊接头热循环条件下的可靠性。

3 结论

1) 苛刻热循环下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RExNi/Cu 钎焊界面 IMC 由(Cu, Ni)₆Sn₅和 Cu₃Sn 相组成。随热循环周期增加,钎焊接头界面 IMC (Cu, Ni)₆Sn₅形态由波浪状转变为局部较大尺寸的“笋状”,IMC 平均厚度和粗糙度增大,相应接头剪切强度降低。添加适量 Ni (0.05%)的钎焊接头界面 IMC 平均厚度和粗糙度最低,接头剪切强度最高。

2) 在 100 热循环周期内随热循环周期增加,Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断口由呈现钎缝处的韧性断裂向由钎缝和 IMC 层组成以韧性为主的韧-脆混合断裂转变。

REFERENCES

[1] SUGANUMA K. 无铅钎焊技术[M]. 宁晓山,译. 北京:科学

出版社,2004:138-152.

SUGANUMA K. Lead-free soldering technology[M]. NING Xiao-shan, transl. Beijing: Science Press, 2004: 138-152.

[2] STELLER A, PAPE U, BLAIR L. Solder joint reliability in automotive applications: New assessment criteria through the use of EBSD[J]. Solid State Phenomena, 2010, 160: 307-312.

[3] 孟工戈,李丹,李正平,王彦鹏,陈雷达. 时效对 SnCuSb/Cu 钎焊接头抗剪强度与断口特征的影响[J]. 焊接学报,2010,31(6): 85-89.

MENG Gong-ge, LI Dan, LI Zheng-ping, WANG Yan-peng, CHEN Lei-da. Effects of aging on shearing strength and fracture surface characteristics of SnCuSb/Cu soldering joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 85-89.

[4] 王俭辛,薛松柏,韩宗杰,汪宁,禹胜林. 温度与镀层对 Sn-Cu-Ni 无铅钎料润湿性能的影响[J]. 焊接学报,2006,27(10): 53-56.

WANG Jian-xin, XUE Song-bai, HAN Zong-jie, WANG Ning, YU Sheng-lin. Effect of temperature and coatings on Sn-Cu-Ni lead-free solder wettability[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(10): 53-56.

[5] 李臣阳,张柯柯,王要利,赵恺,杜宜乐. Ni 元素对 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu 无铅微焊点界面 IMC 和力学性能的影响[J]. 焊接学报,2012,33(11): 39-42.

LI Chen-yang, ZHANG Ke-ke, WANG Yao-li, ZHAO Kai, DU Yi-le. Effect of Ni on interfacial IMC and mechanical properties of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE/Cu solder joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(11): 39-42.

[6] YU D Q, WANG L. The growth and roughness evolution of intermetallic compounds of Sn-Ag-Cu/Cu interface during soldering reaction[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 458(1/2): 542-547.

[7] WANG Yao-li, ZHANG Ke-ke, LI Chen-yang, HAN Li-juan. The morphology and evolution of Cu₆Sn₅ at the interface of Sn-2.5Ag-0.7Cu-0.1RE/Cu solder joint during the isothermal aging[J]. Materials Science Forum, 2012, 704: 685-689.

[8] ZHANG Ning, SHI Yao-wu, GUO Fu, LEI Yong-ping, XIA Zhi-dong, CHEN Zhen-hua, TIAN Li. Comparison of drop performance between the Sn37Pb and the Sn3.8Ag0.7Cu solder joints subjected to drop test[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2011, 22: 292-298.

[9] LIN Kwang-lung, SHIH Po-cheng. IMC formation on BGA package with Sn-Ag-Cu and Sn-Ag-Cu-Ni-Ge solder balls[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 452(2): 291-297.

[10] LIU Ping, YAO Pei, LIU Jim. Evolutions of the interface and shear strength between SnAgCu-xNi solder and Cu substrate during isothermal aging at 150 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1/2): 474-479.

[11] 王要利,张柯柯,李臣阳,衡中皓. RE 对 SnAgCu 钎料合金及焊点性能的影响[J]. 材料热处理学报,2011,32(12): 35-37.

- WANG Yao-li, ZHANG Ke-ke, LI Chen-yang, HENG Zhong-hao. Effect of RE on properties of SnAgCu solder alloy and its joints[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(12): 35–37.
- [12] PANG J H L, PRAKASH K H, LOW T H. Isothermal and thermal cycling aging on IMC growth rate in Pb-free and Pb-based solder interfaces[C]// *The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena In Electronic Systems*. Piscataway: IEEE, 2004: 109–115.
- [13] 许媛媛, 闫焉服, 李 帅, 葛 营. 循环周期对 Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu/Cu 钎焊接头界面化合物的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(1): 93–98.
- XU Yuan-yuan, YAN Yan-fu, LI Shuai, GE Ying. Effect of thermal cycles on intermetallic compounds of Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu/Cu soldering joint[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(1): 93–98.
- [14] 王 烨, 黄继华, 张建纲, 齐丽华. Sn-3.5Ag-0.5Cu /Cu 界面的显微结构[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(3): 495–499.
- WANG Ye, HUANG Ji-hua, ZHANG Jian-gang, QI Li-hua. Microstructure of Sn-3.5Ag-0.5Cu/Cu interface[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(3): 495–499.
- [15] 劳邦盛, 高 苏, 张启运. 固-液金属界面上金属间化合物的非平衡生长[J]. *物理化学学报*, 2001, 17(5): 453–456.
- LAO Bang-sheng, GAO Su, ZHANG Qi-yun. Nonequilibrium growth of intermetallics at the interface of liquid-solid metal[J]. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2001, 17(5): 453–456.
- [16] 刘 平, 钟海锋, 龙郑易, 顾小龙. Ni 对 SAC0307 无铅钎料性能和界面的影响研究[J]. *焊接*, 2014(5): 27–30.
- LIU Ping, ZHONG Hai-feng, LONG Zheng-yi, GU Xiao-long. Effect of Ni on SAC0307 lead-free solder performance and interfaces[J]. *Welding & Joining*, 2014(5): 27–30.

Effect on interface and property of Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_xNi/Cu solder joints in severe thermal cycling

GUO Xing-dong^{1,2}, ZHANG Ke-ke^{1,2}, QIU Ran-feng¹, SHI Hong-xin¹, WANG Yao-li¹, MA Ning¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The effect of severe thermal cycling on the IMC and mechanical property of Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_xNi/Cu solder joint was analyzed by SEM, XRD and EDS. The results show that the Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_xNi/Cu solder joints under severe thermal cycling exhibit duplex intermetallic compounds (IMCs) structure; i.e., a layer of (Cu, Ni)₆Sn₅ close to the solder and a layer of Cu₃Sn adjacent to the Cu substrate. The morphology of the IMC in soldered joints transfers from wavy-shape into larger bamboo shoots with the increasing of thermal cycling, which causes increase of roughness and thickness, as well as decrease of the shear strength. When the Ni adding content of solder alloy is 0.05% (mass fraction), the roughness and average thickness of IMC are the lowest, the shear strength is the highest. Within 100 thermal cycling, the fracture mechanism of the joints exhibits from plastic fracture occurred in the solder seam of Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu to ductile-brittle mixed fracture of plastic fracture oriented in the interfacial of IMC and solder seam.

Key words: lead-free solder alloy; severe thermal cycling; solder joints; intermetallic compound(IMC); property

Foundation item: Project(2014DFR50820) supported by the National Science and Technology International Cooperation; Project(U1604132) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (154200510022) supported by the Plan for Scientific Innovation Talent of Henan Province, China

Received date: 2015-12-04; **Accepted date:** 2016-04-20

Corresponding author: ZHANG Ke-ke; Tel: +86-13837942173; E-mail: zhkeked@163.com

(编辑 龙怀中)