

# BGA 焊点剪切性能的评价

于 洋, 史耀武, 夏志东, 雷永平, 郭 福, 李晓延

(北京工业大学, 北京 100022)

**摘 要:** 设计了用单个微焊球和两块带焊盘的 FR4 板焊接而成的搭接接头, 研究了不同稀土含量及不同加载速率对接头强度及塑性的影响。结果表明, 微量稀土(质量分数 $<0.25\%$ )不但能提高焊点的剪切强度, 而且可以改善焊点的塑性。而当稀土含量进一步增加时, 焊点的强度及塑性均下降。焊点的剪切强度及伸长量随应变速率的增加而增加。通过对焊点显微组织的分析可知, 微量稀土可显著细化焊点的显微组织, 特别是抑制了钎料内部及界面处金属间化合物的生长, 从而改善了焊点的力学性能。对断口形貌的分析同样证明了伸长量随剪切速率增加而增加。

**关键词:** 微焊球; 球栅阵列封装; 剪切强度

**中图分类号:** TG 401

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)03-0468-05

随着终端消费电子产品朝“轻、薄、短、小”及多功能化方向发展, 迫使集成电路封装技术向高密度化、小型化、集成化的方向演变, BGA 封装正是为适应这种发展而出现的一种新型封装技术, BGA 技术的优点是芯片具有高密度 I/O 端子提供可能性。在 BGA 封装中芯片与 PCB 基板是靠排列成栅格的小球相连。这些小球既起到机械连接作用又起到信号传输作用, 所以必须具有高的可靠性。另外, 近年来无铅焊料的研究和开发日益受到重视<sup>[1-3]</sup>, 各国及欧盟均颁布了法令来限制 Pb 在电子产品中的应用。所以在全球无铅化趋势的大环境下, 研究无铅焊点在各种服役条件下的可靠性问题成为研究的焦点<sup>[4,5]</sup>。而了解焊点在各种机械载荷或热载荷下的应力和应变分布或确定其应力-应变曲线对分析焊点可靠性有很大的帮助。

关于应变速率对无铅钎料拉伸性能影响已有很多报道<sup>[6,7]</sup>, 但对于应变速率对 BGA 焊点性能影响的研究报道却非常有限。本实验应用均匀射流断裂法生产 Sn-3.8Ag-0.7Cu-RE BGA 微焊球。自行设计具有单个焊点的 BGA 接头。研究拉伸速率对 BGA 焊点应力、伸长量及断口形貌的影响。

## 1 实 验

用均匀射流断裂法生成 Sn-3.8Ag-0.7Cu-xRE( $x=0, 0.1\%, 0.25\%, 0.5\%$ , 质量分数, 下同) BGA 微焊球。稀土为镧、铈混合稀土<sup>[8]</sup>。操作温度为 260 °C, 所用喷嘴

直径为 0.3 mm。具体的设备信息及生产工艺见文献<sup>[9]</sup>。

自行设计单焊点 BGA 接头, 如图 1 所示。接头由一个微焊球和两块带焊盘的 FR4 板组成, 板厚为 0.5 mm, 焊盘直径为 0.6 mm, 焊盘下金属为 Au/Ni(P)/Cu, 厚度分别为 25~32/10~15/0.5  $\mu\text{m}$ 。

钎焊过程如图 1 所示。清洗焊球和基板并干燥, 在单块基板上植球并回流, 回流工艺如图 2 所示。把经过一次回流的基板倒放在另一块基板上, 两接头之间预置等高垫片来保证焊球塌陷后的高度, 通过模具进行再次回流, 回流焊工艺同上。

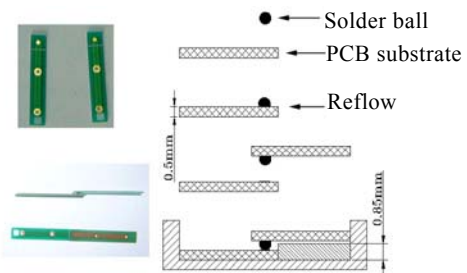


图 1 接头及焊接方法

Fig.1 Soldered specimen and preparation

把焊后的接头进行清洗并干燥, 放入干燥皿中静置 1000 h 去除应力。用计算机控制的 LLOYD 系统-LRX 微拉伸试验机分别以 0.001, 0.01, 0.5 mm/s 速率进行剪切实验。对于每种成分, 每种剪切条件分别进行 10 次实验。拉断后用体视显微镜进行观察, 拉伸试验结果

收稿日期: 2008-03-11

基金项目: 国家“863”高科技发展计划(2002AA322040); “十一五”国家科技支撑重点项目(2006BAE03B02); 北京市自然科学基金资助(012003); 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目; 2006 高等学校博士学科点专项科研基金(20060005006)

作者简介: 于 洋, 男, 1979 年生, 博士生, 北京工业大学材料学院, 北京 100022, 电话: 010-67392523, E-mail: yuy@emails.bjut.edu.cn

为5个试验的平均值并计算标准偏差。保留拉断后的接头,用FEI QUANTA 200F SEM观察断口形貌。

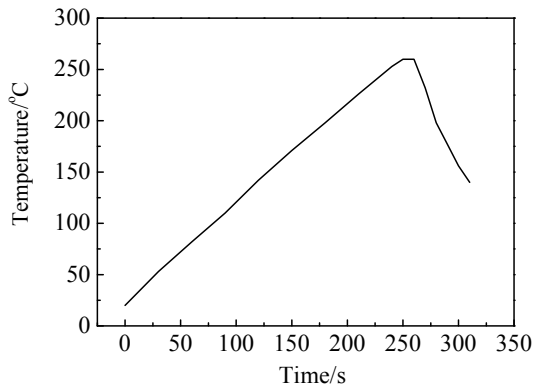


图2 回流工艺

Fig.2 Reflow temperature profile

焊后接头的纵向横截面用环氧树脂进行镶样后,进行磨样、抛光和腐蚀,用SEM观察显微组织。

## 2 结果及讨论

### 2.1 显微组织

钎焊接头的显微组织如图3所示。因为接头一边是经过一次回流,而另一边是经过两次回流,所以两

边的显微组织是有所差别的,为使所选的显微组织图片具有可对比性,特选取经过两次回流的显微组织加以对比。

图3a为Sn-3.8Ag-0.7Cu(SAC)接头显微组织。钎料与基板处形成一层“扇贝”状金属间化合物。经EDX分析可知,此层化合物由Cu:Ni:Sn=25.93:28.45:45.62组成,可确定为 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 。在 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 化合物层与基板上的Ni(P)层之间存在一层深黑色物质,由EDX分析知,此层物质由Ni:P:Sn=74.72:22.45:2.83组成,可以确定为 $Ni_3P+Sn$ 。界面金属间化合物层的上面是由初生 $\beta-Sn$ 及二元共晶( $\beta-Sn+Ag_3Sn$ )组成的钎料基体组织,另外,在紧邻化合物层的钎料基体上存在两种金属间化合物,一种是以大块形式存在,另一种为长针状。经EDX分析知,大块为 $Cu_6Sn_5$ ,长针状为 $Ag_3Sn$ 。

图3b为SAC-0.1RE接头的组织。与SAC接头相比,同样,在钎料与基板处形成 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 化合物层,但厚度有减小的趋势;钎料基体也由初生 $\beta-Sn$ 及二元共晶( $\beta-Sn+Ag_3Sn$ )组成,但大块 $Cu_6Sn_5$ 和针状 $Ag_3Sn$ 基本消失。SAC-0.25RE接头与SAC-0.1RE接头显微组织组成一致,但钎料基体中初生 $\beta-Sn$ 相及界面处的金属间化合物层均显著细化,如图3c所示。与SAC-0.25RE接头组织相比,SAC-0.5RE接头钎料基体中的 $\beta-Sn$ 变得粗大,如图3d所示。

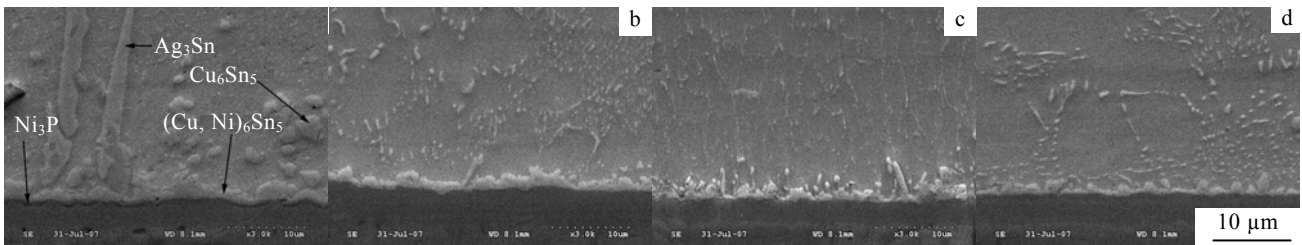


图3 Sn-3.8Ag-0.7Cu-xRE 接头显微组织

Fig.3 Microstructure of Sn-3.8Ag-0.7Cu-xRE solder joints: (a)  $x=0\%$ , (b)  $x=0.1\%$ , (c)  $x=0.25\%$ , and (d)  $x=0.5\%$

当稀土含量超过0.25%时,在钎料内部会发现大块的稀土化合物,EDX分析表明,该化合物主要为 $LaSn_3+CeSn_3+Sn$ 。如图4所示。由图4可知,微量RE( $<0.25\%$ )可以显著细化初生 $\beta-Sn$ 相和界面处的金属间化合物层,并抑制钎料基体中金属间化合物的生长;而当进一步增加RE时,初生 $\beta-Sn$ 相又变得粗大。RE是表面活性元素,它们具有较大的原子半径,几乎不溶于任何金属。在焊接过程中,当少量的RE元素不足以形成稀土相时,RE原子会吸附于晶界处,降低液态合金的表面能,抑制晶粒的生长,所以细化了组织。RE过多时,则RE主要以稀土相形式存在,只有

少量分布于晶界处,因此晶界约束作用减小,初生 $\beta-Sn$ 相长得比较粗大。

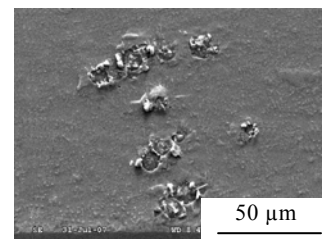


图4 稀土化合物相

Fig.4 RE compounds

### 2.2 焊接接头的剪切性能

SAC 钎焊接头在不同剪切速率下的应力-伸长量曲线如图 5 所示。随剪切速率的增加，剪切强度和最终断裂时的伸长量都增大。

图 6 展示了剪切断裂时的伸长量与稀土含量之间的关系曲线。可以看出随稀土含量的增加，伸长量先有所增大后又随之减小。在高应变速率下的伸长量大于低应变速率的伸长量。

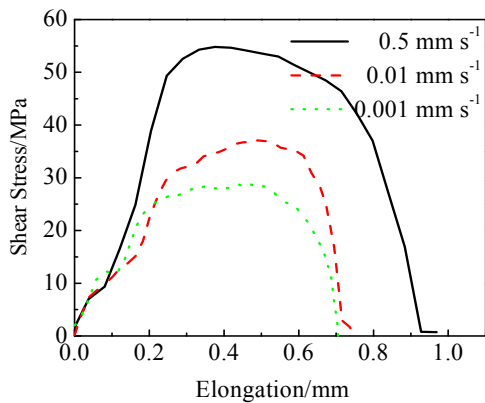


图 5 Sn-3.8Ag-0.7Cu 应力-伸长量曲线  
Fig.5 Stress-elongation curves

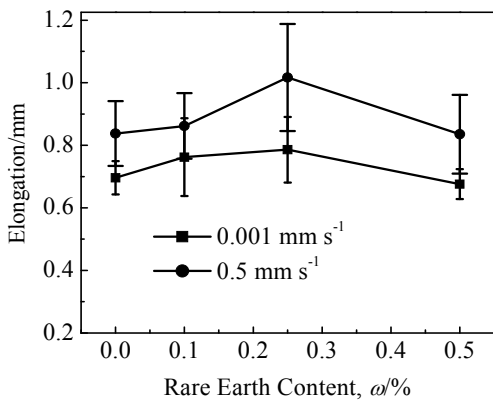


图 6 稀土含量对试样伸长量的影响  
Fig.6 Effect of RE on Elongation

图 7 展示了应变速率对 SAC-xRE(x=0, 01%, 0.25%, 0.5%) 钎焊接头剪切强度的影响。可以看出，无论 BGA 焊球是否含稀土，焊接接头的剪切强度均随应变速率的增加而增加。对于同一应变速率，在稀土含量小于 0.25%时，焊接接头的剪切强度随稀土含量的增加而有所增长，而进一步增加稀土含量到 0.5%时，接头的剪切强度却降低。

从以上结果可以总结出，在 SAC 合金焊球中添加不超过 0.25%稀土，焊接接头在高/低应变速率下剪切

时，剪切强度与伸长量均有所增加。说明稀土细化了接头组织，提高了接头的强度和韧性。随稀土含量的增加，分布在晶界附近的稀土化合物也增多，并且会积聚在一起，由于稀土化合物与钎料基体之间力学性能的差异，在受力时增加了微孔形成的机率，而导致强度和韧性下降。

一般而言，合金在受力变形时会同时经历加工硬化和动态回复过程。二者对合金力学性能的影响正相反，加工硬化起硬化合金的作用，而动态回复是软化合金。加工硬化和动态回复过程在不同加载速度下的消长不同，加载速度越快，回复过程越不能充分进行，则硬变强化作用越凸显，导致较高的断裂强度。按常规而言，回复过程不能充分进行会导致塑性下降，这也是一般合金(Al、Cu 等)的表现，但这与本试验的结果正相反，伸长量随剪切速率增加而增加，认为这与提高应变速率而引起热效应有关<sup>[10]</sup>。因为锡基钎料合金的熔点较低，高速加载会导致合金温度升高，促进回复过程的进行，提高了合金的塑性。

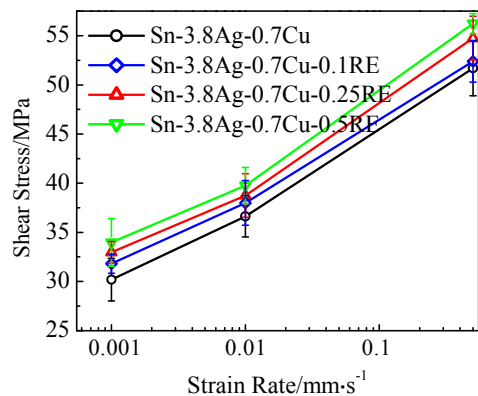


图 7 应变速率对试样剪切强度的影响  
Fig.7 Effect of strain rate on shear strength

### 2.3 断口形貌

图 8 和图 9 分别展示了在 0.01 mm/s 和 0.5 mm/s 速率下产生的钎焊接头的断口形貌。可以看出，在不同应变速率下断裂的断口基本都呈现出韧性断裂。断口大致可分为两个区域，一是刚开始断裂的等轴韧窝区，另一个是抛物线韧窝区。

在剪切开始时，随着应力不断增大，微孔就会在晶界或钎料基体与第二相颗粒的结合部位形成，随后与滑移来的位错相作用而长大、积聚，在正应力的作用下被撕开时，成为等轴的韧窝；而后由于承载面积的减小，剩余面积内微孔在剪应力作用下被撕开，并形成抛物线形韧窝。

与低应变速率相比, 在高应变速率下形成断口, 等轴韧窝更深或几个小韧窝合并为一个大的韧窝的趋

势; 而抛物线形韧窝被拉得更长。这也证明了在高应变速率时, 剪切的伸长量更大的结果。

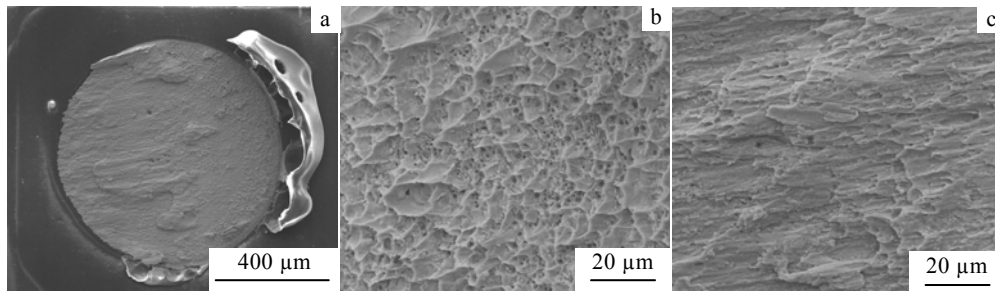


图8 Sn-3.8Ag-0.7Cu-0.5RE 断口形貌(0.01 mm/s)

Fig.8 Fractograph of Sn-3.8Ag-0.7Cu-0.5RE: (a) overview, (b) parabolic dimples, and (c) equiaxed dimples

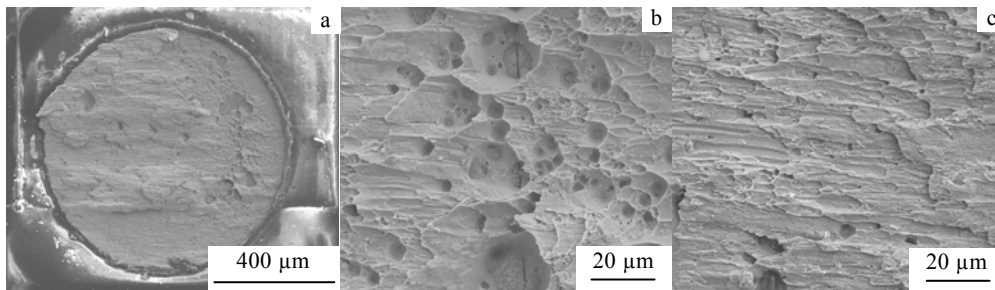


图9 Sn-3.8Ag-0.7Cu-0.5RE 断口形貌(0.5 mm/s)

Fig.9 Fractograph of Sn-3.8Ag-0.7Cu-0.5RE: (a) overview, (b) parabolic dimples, and (c) equiaxed dimples

### 3 结 论

1) 微量 RE (<0.25%) 可以显著细化初生  $\beta$ -Sn 相和界面处的金属间化合物层, 并抑制钎料中金属间化合物的生长; 而当进一步增加 RE 时,  $\beta$ -Sn 又变得粗大。当稀土含量 >0.25% 时, 稀土相会在钎料中聚合为大块的稀土化合物相  $\text{LaSn}_3 + \text{CeSn}_3 + \text{Sn}$ 。

2) 微量 RE (<0.25%) 可以提高焊接接头的塑性和强度, 而进一步增加稀土含量时, 会使接头的塑性和强度降低。

3) 增加应变速率会提高焊接接头的强度和塑性。

4) 剪切断口呈韧性断裂, 大致可分为等轴韧窝区和抛物线形韧窝区。对于同成分接头, 提高应变速率会使韧窝更深或被拉得更长。

#### 参考文献 References

[1] Hao Hu (郝 虎), Tian Jun (田 君), Shi Yaowu (史耀武) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(S2): 121

[2] Chen Guohai(陈国海), Li Xiaoyan (黎小燕), Geng Zhiting (耿志挺) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(11): 1122

[3] Zhou Jian(周 健), Sun Yangshan(孙扬善), Xue Feng(薛 烽) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 33(4): 613

[4] Zhang Keke (张柯柯), Wang Yaoli (王要利), Fan Yanli (樊艳丽) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(8): 1473

[5] Yan Yanfu (阎焉服), Shi Yaowu (史耀武), Liu Jianping (刘建萍) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(4): 622

[6] Feng quan Lang, Hiroyuki Tanka, Osamu Munegata, *et al.* *Materials Characterization*[J], 2005, 54: 223

[7] Ikuo Shohji, Tomohiro Yoshida, Takehiko Takahashi *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2004, A366: 50

[8] Chen Zhigang(陈志刚). *Doctor Thesis*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003

[9] Yu Yang(于 洋), Shi Yaowu(史耀武), Xia Zhidong(夏志东)

*et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料  
与工程)[J], 2008, 37(6): 1092

[10] Wei Xicheng, Fu Renyu, Li Lin. *Materials Science and  
Engineering A*[J], 2007, 465: 260

## Evaluation on the Shear Properties of BGA Solder Joint

Yu Yang, Shi Yaowu, Xia Zhidong, Lei Yongping, Guo Fu, Li Xiaoyan  
(Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** In this paper, soldered lap joint specimens were fabricated by a solder reflow process using a Sn-3.8Ag-0.7Cu-xRE ( $x=0, 0.1\text{wt}\%, 0.25\text{wt}\%, 0.5\text{wt}\%$ ) BGA solder ball on FR4 substrate parts. The effects of rare earth(RE) content and strain rate on the shear properties of soldered lap joint were investigated. The Results show that the addition of minute RE ( $<0.25\text{wt}\%$ ) can improve the shear strength and elongation of the lap joint. However, further increasing of RE content would degrade the shear properties of the lap joint. The shear strength and elongation of the lap joint increase with the increase of strain rate. The analysis of the microstructure and fractograph indicated that through the addition of minute RE, the microstructure of the lap joint was refined, especially the growth of intermetallic compound was inhibited, and thus the shear properties of the lap joint were improved. In addition, the observation of fractographs confirmed that the elongation of the lap joint increase with the increase of strain rate.

**Key words:** solder ball; ball grid array packaging (BGA); shear strength

---

Biography: Yu Yang, Candidate for Ph. D., College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, P. R. China, Tel: 0086-10-67392523, E-mail: yuy@emails.bjut.edu.cn