



Bi 含量对 Cu/Sn-0.3Ag-0.7Cu/ Cu 微焊点蠕变性能的影响

姚宗湘^{1,2}, 罗 键¹, 尹立孟², 王 刚², 蒋德平³, 夏文堂²

1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院, 重庆 401331;
3. 重庆科技学院 机械与动力工程学院, 重庆 401331)

摘 要: 采用光学显微镜、电子显微镜和动态力学分析等方法研究 Bi 含量对直径为 400 μm 、高度为 200 μm 的无铅 Cu/Sn-0.3Ag-0.7Cu(SAC0307)/Cu 微尺度焊点的显微组织及蠕变性能的影响。结果表明: 当焊点中 Bi 含量较低(1%(质量分数))时, 其基体组织细小, Cu_6Sn_5 为粗大块状, Ag_3Sn 分布不均匀; 当焊点中 Bi 含量较多(3%(质量分数))时, 基体组织与 Cu_6Sn_5 进一步细化, Ag_3Sn 在细化的同时分布更均匀, 界面扇贝状 IMC 层更平直。另外, 温度为 80~125 $^{\circ}\text{C}$ 、应力为 8~15 MPa 条件下, 拉伸蠕变试验得到 SAC0307 微焊点的蠕变激活能(Q)和蠕变应力指数(n)分别为 82.9 kJ/mol 和 4.35; 当钎料中 Bi 含量由 1.0%增加到 3.0%时, 焊点的 Q 值从 89.2 kJ/mol 增加到 94.6 kJ/mol, n 值由 4.48 增加到 4.73, 钎焊接头的抗蠕变能力明显提高, 所有焊点的蠕变变形机制主要受位错攀移控制。

关键词: 电子封装; 低银无铅钎料; 微焊点; 蠕变; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2017)-12-2545-07

中图分类号: TN601

文献标志码: A

焊点在电子封装中主要起着机械连接、电气连接和热交换的作用, 从而确保电子元器件之间的可靠互连互通以及固定在印刷电路板上^[1-2]。伴随电子产品趋向微小型化、轻量便携化和多功能化等方向发展, 焊点所承受的力学、电学以及热学负载逐渐增加, 多重载荷的耦合作用极易造成焊点的提前失效, 蠕变变形与破坏无疑是其中最为主要的力学失效形式之一^[3]。由于锡基无铅钎料的熔点(熔化温度)普遍较低, 使得微焊点在服役条件下的同系温度(T/T_m)甚至能达到 0.75 以上, 导致钎料焊点的蠕变现象十分明显^[1], 因此无铅微焊点的蠕变被视为电子封装重要的可靠性问题而备受广泛关注^[4]。

目前, 以 Sn-0.3Ag-0.7Cu(简称 SAC0307)为代表的低银无铅钎料的研究开发已成为国内外的热点问题, 并且已经初步应用于部分电子产品中^[5-6]。但是由于此种钎料合金中 Ag 的含量较低, 导致其熔点稍高, 润湿性稍差, 钎料的剪切强度和铺展率将降低, 故其使用受到一定的限制。微合金化是改善低银钎料性能的主要方法之一。目前, 关于 SAC0307 微合金化的研

究主要以加入 Bi、Ni 为主^[7-11], 相关研究^[8, 10-12]表明, 微量合金元素的加入(如 Bi)能降低界面 IMC 的生长速度, 提高了接头剪切强度和抗老化程度。不过, 从蠕变性能角度研究低银微焊点的失效行为与机制目前还非常欠缺。因此, 本文作者以 SAC0307 为研究对象, 研究适量 Bi 对 SAC0307 微焊点蠕变性能的影响规律, 以期改善低银无铅钎料及其微焊点的抗蠕变性能, 提高使用寿命, 同时为新型无铅钎料的研发提供科学依据与参考。

1 实验

试验用钎料合金制备方法如下: 首先采用纯度为 99.5%的锡粒、99.95%银颗粒和 99.99%无氧铜丝在陶瓷坩埚熔炼炉中制备 SAC0307 钎料; 然后以 SAC0307 为基础, 分别添加 1%、3%(质量分数)的 Bi 元素来制备新的钎料合金(分别称为 SAC0307-1Bi 和 SAC0307-3Bi), 为减少钎料合金的氧化, 钎料合金制备时采用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674056, 51174246); 重庆市前沿与应用基础研究项目(CSTC2014JCYJA40009); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金(AWJ-M15-05); 重庆市高校创新团队建设计划资助项目(CXTDX201601032)

收稿日期: 2016-01-04; 修订日期: 2016-12-09

通信作者: 尹立孟, 教授, 博士; 电话: 15023730501; E-mail: yeenlm@cqust.edu.cn

LiCl 和 KCl 熔融共晶盐覆盖保护(LiCl 和 KCl 的质量比为 1:1.3)。

钎焊接头试样的形状如图 1。钎焊前, 先将钎料精细切割成微颗粒待用, 并与一端磨平的无氧铜丝 ($d=0.4\text{ mm}\times 30\text{ mm}$) 一起放置于超声波容器中清洗 5~8 min, 然后一并取出并清洗干净后吹干。采用自制带“V 型沟槽”的铝制夹具控制微焊点的精确装配并进行焊接(如图 1 所示), 微尺度焊点的制备是在模拟真实再流焊条件下进行的。为增强活性及去氧化物能力, 钎焊采用添加 5% ZnCl_2 (质量分数)的松香酒精溶液做助焊剂。制备的焊点高度控制在 $200\text{ }\mu\text{m}$, 钎焊后的焊点在超声波中清洗并用 1000~2500 号砂纸打磨光滑以备使用。

钎焊后焊点的显微组织采用扫描电镜(SEM)观察, 相采用 X 射线衍射(XRD)确定, 同时采用高精度动态力学分析仪(DMA Q800)进行蠕变试验, 试验温度选定为 $80\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$, 拉伸应力载荷设定为 $8\sim 15\text{ MPa}$ 。每一个试验参数下做 3 个蠕变试验样品, 取其平均值作为该参数下的最终试验结果。

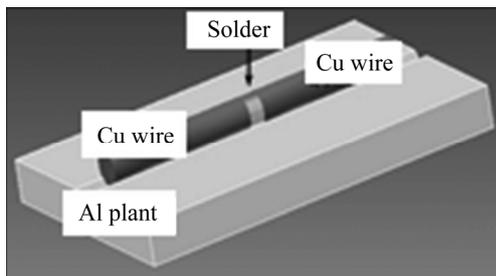


图 1 制备微焊点用装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparing solder joint samples

2 结果与讨论

2.1 钎焊焊点相及显微组织分析

图 2 所示为钎料 SAC0307、SAC0307-1Bi 和 SAC0307-3Bi 的微焊点 XRD 谱。由图 2 可看出, SAC0307、SAC0307-1Bi 钎焊合金的焊点主要由 Sn、 Ag_3Sn (IMC)和 Cu_6Sn_5 (IMC)组成, SAC0307-3Bi 的微焊点由 Sn、 Ag_3Sn (IMC)、 Cu_6Sn_5 (IMC)及 Bi 相组成。

图 3 所示为 SAC0307、SAC0307-1Bi 和 SAC0307-3Bi 3 种成分钎料合金的钎焊接头 SEM 像。从图 3 中可以看出, 钎焊时钎料和 Cu 丝之间形成一层很薄的扇贝状 IMC 层, 经 EDS 分析为 Cu_6Sn_5 。随着 Bi 含量的增加, IMC 层的厚度不断减小, 且由前端起伏很大的扇贝状(见图 3(b))转变为起伏较为平缓的扇贝状

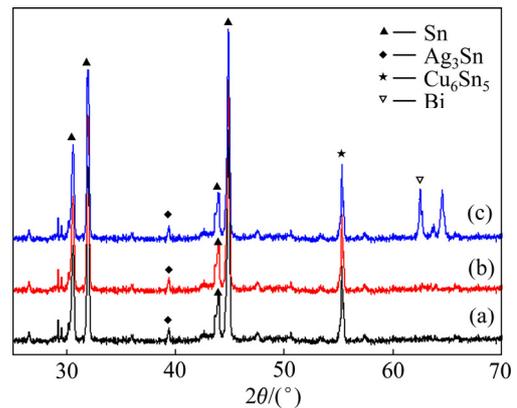


图 2 SAC0307、SAC0307-1Bi 和 SAC0307-3Bi 焊点的 XRD 谱
Fig. 2 XRD patterns of SAC0307(a), SAC0307-1Bi(b) and SAC0307-3Bi(c) joints

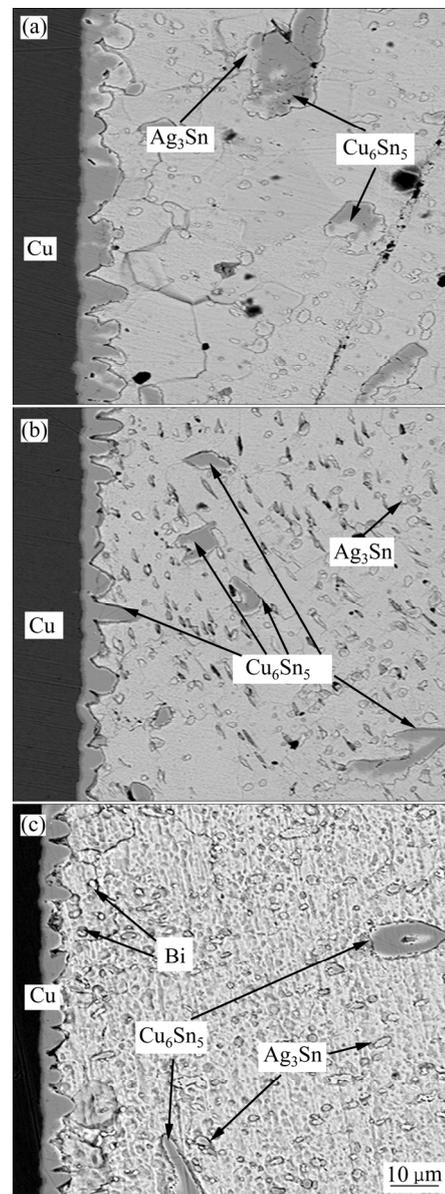


图 3 不同钎料接头的 SEM 显微组织
Fig. 3 SEM images of different solder joints: (a) SAC0307; (b) SAC0307-1Bi; (c) SAC0307-3Bi

(见图 3(c))。由此可知, Bi 元素的添加在一定程度上减缓了 IMC 层的生长速度, SAC0307-3Bi 钎料合金的微焊点 IMC 层生长最慢且起伏最小, 而 SAC0307 钎料合金的微焊点 IMC 层生长最快, 这与文献[13]的研究相吻合。

从图 3 还可看出, 钎焊焊点组织主要由先共晶相 β -Sn 组成, 此外还有少量的金属间化合物 Cu_6Sn_5 和 Ag_3Sn 。图 3(a)中, 焊点内部主要是粗大的 β -Sn 晶粒和规则分布在富 Sn 基体中的 IMC 颗粒, 经 EDS 分析可知, 深灰色成大片状的块体物是 Cu_6Sn_5 , 而明亮的灰色小颗粒是 Ag_3Sn 。钎料基体中加入 Bi 后, 能够细化 Ag_3Sn 和 Cu_6Sn_5 (见图 3(b)和 3(c)), 当 Bi 含量增加到 1%时, 细化的倾向显著(见图 3(b)), 当 Bi 含量继续增加到 3%时, Cu_6Sn_5 细化倾向不明显, 但数量稍有减少(见图 3(c))。其主要原因是, Bi 加入到 SAC0307 中降低了钎料的熔化温度, 增加了结晶时的过冷度, 加之焊点尺寸较小使冷却速度增大, 导致 β -Sn 更细小和 IMC 增多且沿着基体相的界面较均匀分布。

2.2 恒应力不同温度下的蠕变行为和蠕变激活能 Q
在 80~125 °C 的试验温度范围内, 直径为 400 μm 、

高度为 200 μm 3 种钎料的微焊点在 15 MPa 恒定外加拉伸载荷作用下的蠕变变形与加载时间的关系如图 4。从图 4 可知, 在 80、90、100 和 125 °C 4 种温度下所有焊点的蠕变曲线均存在初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段(也称蠕变断裂阶段)等 3 个蠕变变形阶段。微焊点的蠕变寿命主要是由占整个蠕变变形过程相当大比例的稳态蠕变阶段决定的, 因此, 表征稳态蠕变速率对微电子封装连接器件的寿命预测具有重要的意义。

由蠕变曲线计算出的 3 种组分钎料钎焊焊点在 15 MPa 应力作用下蠕变速率($\dot{\epsilon}$)及蠕变断裂时间(t)如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 在试验温度和应力相同的情况下, 添加微量 Bi 的两种钎料钎焊接头稳态蠕变速率均小于 SAC0307 钎焊接接头的, 尤其是 SAC0307-3Bi 钎焊接头的蠕变速率非常低, 且它们的蠕变寿命均明显高于 SAC0307 钎料的。另外, 从表 1 还可以看出, 随着试验温度的提高, 3 种钎料钎焊接头的蠕变速率均明显提高, 蠕变断裂时间显著缩短。比如, 在 125 °C 时, SAC0307 稳态蠕变速率为 $2.80 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 约是 80 °C 的 22 倍; 断裂时间为 600 s, 比 80 °C 的缩短了

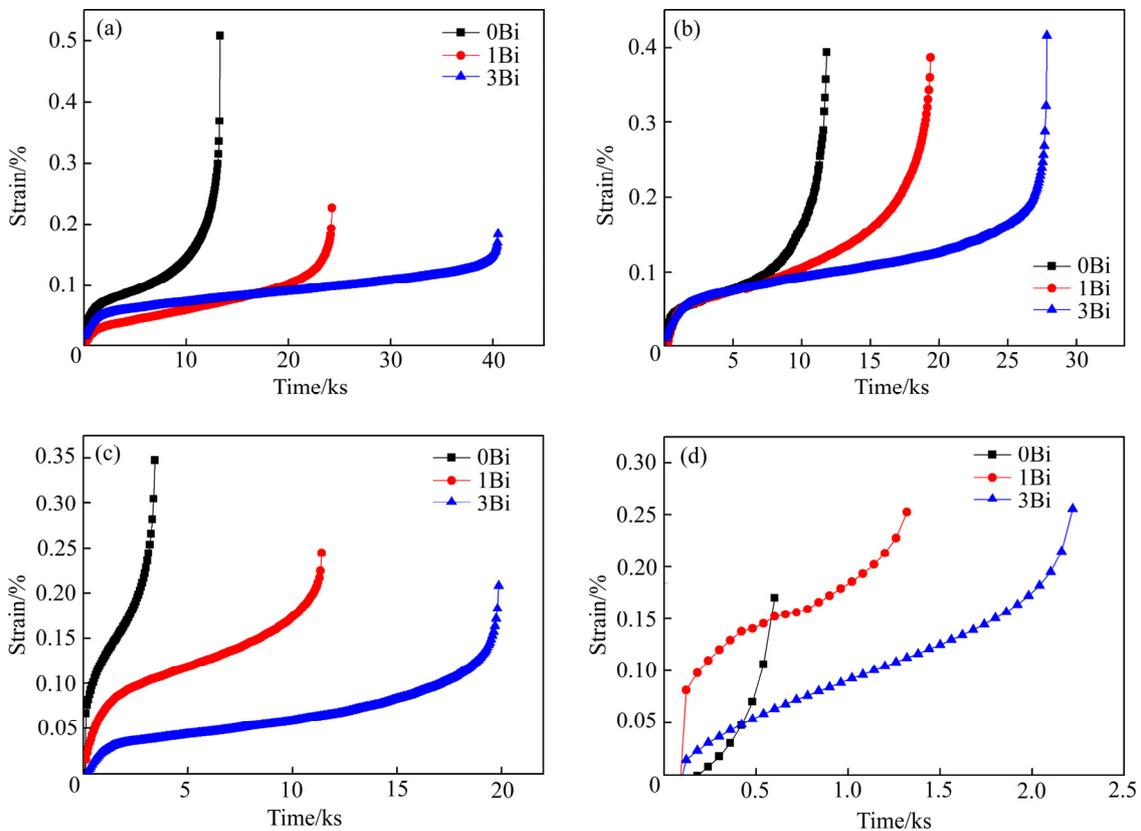


图 4 15 MPa 时不同温度下 SAC0307-xBi 微焊点应变-时间曲线

Fig. 4 Strain-time curves of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at different temperatures and 15 MPa: (a) 80 °C; (b) 90 °C; (c) 100 °C; (d) 125 °C

表1 15 MPa 时 SAC0307-xBi 微焊点在不同温度下的蠕变性能

Table 1 Creep properties of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at different temperatures and 15 MPa

w(Bi)/ %	80 °C		90 °C		100 °C		125 °C	
	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-7} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-7} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-7} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-6} \text{ s}^{-1}$
0	13320	1.19	10680	2.6	3420	7.8	600	2.80
1	24240	0.38	19380	9.7	11400	3.4	1380	1.16
3	39300	0.18	26040	4.6	19260	8.5	2160	0.70

近 12600 s。这主要是由于温度升高，原子的扩散、位错及晶界的运动均加剧，使蠕变变形更易发生。

通常情况下，稳态蠕变速率是与应力和温度相关的函数，一般可使用表达式(1)所示的 Norton 幂律公式来表达^[14]：

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中： $\dot{\epsilon}$ 为稳态蠕变速率； A 为与组织相关的常数； σ 为应力； n 为蠕变应力指数； Q 为蠕变激活能； R 为摩尔气体常数； T 为热力学温度。

蠕变激活能 Q 是幂律公式中的一个重要的参数，对分析蠕变变形的规律和蠕变寿命的预测有十分重要的作用。

对式(1)两边分别取自然对数后，可以得到

$$\ln \dot{\epsilon} = -\frac{Q}{RT} + \ln A + n \ln \sigma \quad (2)$$

当应力不变时， $\ln A + n \ln \sigma = C_1$ 为常数，故

$$\ln \dot{\epsilon} = C_1 - \frac{Q}{RT} \quad (3)$$

从式(3)可以看出，当应力不变时， $\ln \dot{\epsilon}$ 和 T^{-1} 呈直线关系，斜率为 $-Q/R$ 。从图 5 稳态蠕变速率与温度的关系可以看出，同一条件下的 4 个点有较好的直线关系。从各条直线的斜率可以得到蠕变激活能 Q 值，如表 2 所示。从表 2 可以看出，所有的微焊点在 15 MPa 应力和 4 个不同温度下的蠕变激活能均在 81~96 kJ/mol，这一研究结果与一些文献得到的 Sn 基钎料或微焊点的蠕变激活能比较接近，如 75~95 kJ/mol^[15]。同时还发现，Bi 的加入提高了焊点的蠕变激活能，且随着 Bi 含量的增加，微焊点的蠕变激活能增加，Bi 含量为 3% 时蠕变激活能最大。

2.3 恒温度不同应力下的蠕变曲线和蠕变应力指数 n

为测量并计算 SAC0307-xBi 微尺度焊点的蠕变应力指数，蠕变试验温度设定为 125 °C 恒定不变，4 种不同的拉应力载荷分别为 8、10、12、15 MPa。图 6 所示为上述试验温度下的应变-时间蠕变曲线。

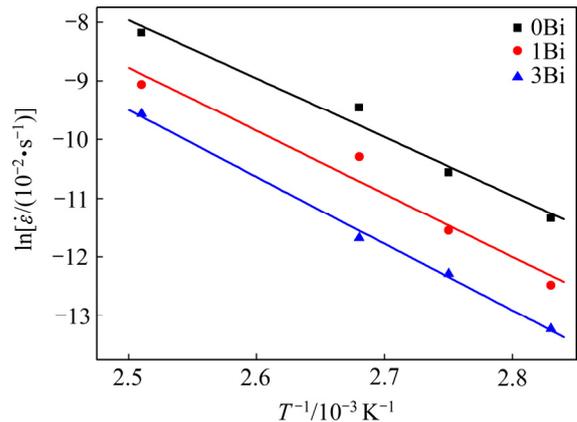


图5 微焊点的温度与稳态蠕变速率的关系

Fig. 5 Relationships between steady-state creep rate and temperature of solder joints

表2 15 MPa 时 SAC0307-xBi 微焊点的蠕变激活能 Q Table 2 Creep activation energy (Q) of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at 15 MPa

w(Bi)/%	Linear slope/ K^{-1}	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
0	-9916	82.9
1	-10734	89.2
3	-11355	94.6

从图 6 可以看出，在应力较低作用下，蠕变速率很慢，随着应力水平的提高，微尺寸焊点的稳态蠕变速率明显变快，而蠕变断裂时间则显著缩短。通过图 6 所示的蠕变曲线计算得到相同温度下 SAC0307-xBi 微尺寸焊点的稳态蠕变速率和蠕变断裂时间如表 3 所示。

对表达式(1)两边分别取对数，然后两边分别就 $\lg \sigma$ 求导，可得到蠕变应力指数 n 的近似表达式：

$$n = \left(\frac{\partial \lg \dot{\epsilon}}{\partial \lg \sigma}\right) \quad (4)$$

从式(4)可以看出，当温度恒定时， $\lg \dot{\epsilon}$ 和 $\lg \sigma$ 呈直线关系，斜率就是蠕变应力指数 n 。从图 7 稳态蠕变速率与拉应力的关系可以看出，同一条件下的 4 个点有较好的直线关系。从各条直线的斜率可以得到蠕

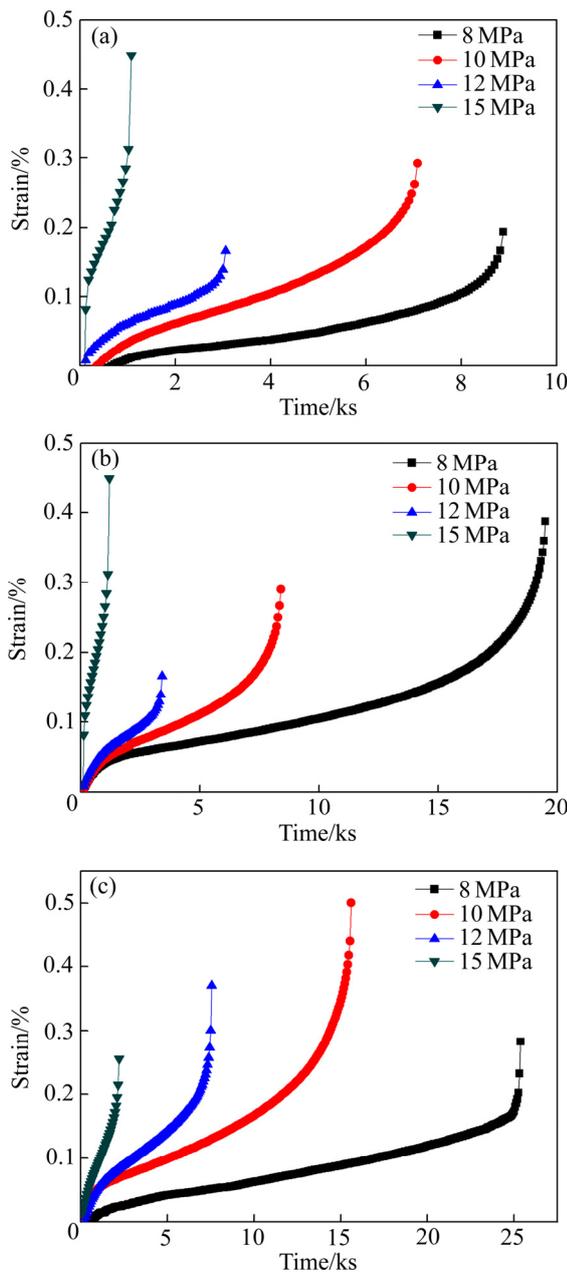


图 6 125 °C 时不同应力下 SAC0307-xBi 微焊点应变-时间曲线
Fig. 6 Strain-time curves of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at different stresses and 125 °C: (a) SCA0307; (b) SCA0307-1Bi; (c) SCA0307-3Bi

表 3 125 °C 时 SAC0307-xBi 微焊点在不同应力下的抗蠕变性能

Table 3 Creep properties of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at different stresses and 125 °C

w(Bi)/ %	8 MPa		10 MPa		12 MPa		15 MPa	
	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-7} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-7} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-6} \text{ s}^{-1}$	t/s	$\dot{\epsilon}/10^{-6} \text{ s}^{-1}$
0	9120	1.65	7080	2.3	3060	0.37	600	2.80
1	19500	0.63	8640	1.58	3660	0.26	1380	1.16
3	25380	0.35	15600	1.03	7560	0.23	2160	0.70

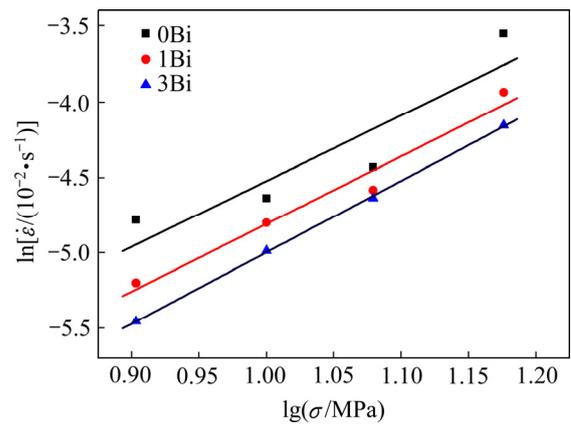


图 7 SAC0307-xBi 微焊点的 $\lg \dot{\epsilon}$ 与 $\lg \sigma$ 关系

Fig. 7 Relationships between $\lg \dot{\epsilon}$ and $\lg \sigma$ of SAC0307-xBi micro-scale solder joints

变应力指数 n , 如表 4 所示。从表 4 可以得出: SAC0307 低银无铅钎料合金中加入 Bi 元素后, 焊点的平均应力指数 n 会随之提高, 即抗蠕变性能增加, 但 n 值均在 4~5 之间, 这一结果与理论计算纯 Sn 钎料的蠕变应力指数 n 值 4~9^[15] 比较接近, 说明 Sn 基钎料成分微量变化对蠕变应力指数和蠕变激活能的影响不大, 是受同样的蠕变机制作用造成的结果。

当 $n \approx 3$ 时是位错滑移控制的蠕变; n 为 4~6 时, 由位错攀移运动控制的蠕变^[16]。根据试验结果可知, SAC0307、SAC0307-1Bi 和 SAC0307-3Bi 钎料微焊点的蠕变应力指数 n 值均在 4~5 之间, 激活能 Q (在 80~95 kJ/mol 之间) 与 β -Sn 的晶格自扩散激活能的值接近 (β -Sn 的晶格自扩散激活能为 97 kJ/mol^[15]), 因此, SAC0307-xBi 钎料微焊点的拉伸蠕变变形机制主要是由位错攀移控制, 位错攀移的速度由位错管道扩散速度来决定, 这与 WITKIN^[17] 的研究结果较接近。微焊点中添加 Bi 元素后, Bi 固溶在 Sn 中造成晶格畸变阻碍晶体滑移面的位错运动, 导致焊点的变形抗力增加, Bi 颗粒聚集在晶界处对位错有钉扎作用, 所以含有 Bi 元素的微焊点 n 值和 Q 值均增加, 即抗蠕变能力提高, 这与文献[18]研究结果相吻合。

表 4 125 °C 时 SAC0307-xBi 低银无铅微焊点蠕变应力指数 n

Table 4 Creep stress exponent (n) of SAC0307-xBi micro-scale solder joints at 125 °C

w(Bi)/%	n
0	4.35
1	4.48
3	4.73

3 结论

1) 当 SAC0307 钎料合金中加入 1% Bi 元素时, 焊点内部的金属间化合物 Cu_6Sn_5 相为粗大的块状, Ag_3Sn 在基体中的分布也不均匀, 界面 IMC 层呈起伏较大的扇贝状; 当 Bi 含量增加到 3% 时, 焊点内部的 Cu_6Sn_5 块体相由粗大变为细小, Ag_3Sn 也变得细小而均匀, 界面 IMC 层变为起伏平缓的扇贝状, 表明 SAC0307 中加入适量 Bi 元素能够细化组织。

2) 所有的 SAC0307-xBi/Cu 低银无铅钎料的钎焊接头的蠕变曲线均包含初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段, 随着温度升高或应力增大, 稳态蠕变速率大幅度增加, 蠕变寿命明显降低。

3) 不同 Bi 含量的钎料钎焊接头, 蠕变激活能均在 80~95 kJ/mol 内, 蠕变应力敏感指数为 4~5; 随着 Bi 元素的加入 SAC0307 钎料微焊点的蠕变性能提高。当 Bi 含量为 3% 时, 钎焊接头的蠕变激活能和蠕变应力最大, 即材料的抗蠕变性能最好。

4) 3 种钎料钎焊接头的拉伸蠕变变形机制主要受位错攀移控制。

REFERENCES

[1] YIN L, WEI S, XU Z, GENG Y. The effect of joint size on the creep properties of microscale lead-free solder joints at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(4): 1369–1374.

[2] 尹立孟, 姚宗湘, 林捷翔, 窦鑫. 不同体积无铅微尺寸焊点的蠕变力学性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 61–64.

YIN Li-meng, YAO Zong-xiang, LIN Jie-xiang, DOU Xin. Creep properties of microscale lead-free solder joints with different volumes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(6): 61–64.

[3] LEE K O, MORRIS J W, HUA F. Mechanisms of creep deformation in pure Sn solder joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(3): 516–526.

[4] 尹立孟, Michael Pecht, 位松, 耿燕飞, 姚宗湘. 焊点高度对微尺度焊点力学行为的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 27–30.

YIN Li-meng, PECHT Michael, WEI Song, GENG Yan-fei, YAO Zong-xiang. Effect of joint height on the mechanical behaviors of micro-scale solder joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 27–30.

[5] CHENG F, GAO F, ZHANG J, JIN W, XIAO X. Tensile properties and wettability of SAC0307 and SAC105 low Ag lead-free solder alloys[J]. Journal of Materials Science. 2011, 46(10): 3424–3429.

[6] 尹立孟, 姚宗湘, 耿燕飞, 林捷翔, 陆宇浩. Sn-0.3Ag-0.7Cu 低银无铅微尺度焊点的蠕变性能研究[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(1): 56–59.

YIN Li-meng, YAO Zong-xiang, GENG Yan-fei, LIN Jie-xiang, LU Yu-hao. Creep properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu low-Ag lead-free micro-scale solder joints[J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(1): 56–59.

[7] ZHANG X P, YU C B, ZHANG Y P, SHRESTHA S, DORN L. Processing treatment of a lead-free Sn-Ag-Cu-Bi solder by rapid laser-beam reflowing and the creep property of its soldered connection[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193(4): 539–542.

[8] 孙凤莲, 胡文刚, 王丽凤, 马鑫. Bi 对 Sn-0.3Ag-0.7Cu 无铅钎料熔点及润湿性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 5–8.

SUN Feng-lian, HU Wen-gang, WANG Li-feng, MA Xin. Influence of Bi on the melting point and wettability of Sn-0.3Ag-0.7Cu lead-free solder[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 5–8.

[9] HU Wen-gang, SUN Feng-lian, WANG Li-feng. The wettability of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xBi Pb-free solders[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 4(27): 38–41.

[10] LIU Yang, SUN Feng-lian, LIU Yang, LI Xue-mei. Effect of Ni, Bi concentration on the microstructure and shear behavior of low-Ag SAC-Bi-Ni/Cu solder joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(6): 2627–2633.

[11] 刘洋, 孙凤莲. Ni 和 Bi 元素对 SnAgCu 钎焊界面金属化合物生长速率的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 460–464.

LIU Yang, SUN Feng-lian. Effect of Ni and Bi addition on growth rate of intermetallic compound of SnAgCu soldering[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 460–464.

[12] 王要利, 张柯柯, 韩丽娟, 温洪洪. Sn-2.5Ag-0.7Cu(0.1RE)/Cu 焊点界面区微观组织与 Cu_6Sn_5 的生长动力学[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 708–713.

WANG Yao-li, ZHANG Ke-ke, HAN Li-juan, WEN Hong-hong. Microstructure and growth behavior of Cu_6Sn_5 for Sn-2.5Ag-0.7Cu(0.1RE)/Cu solder joint interface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 708–713.

- [13] 赵杰, 迟成宇, 程从前. Bi 对 Sn-3Ag-0.5Cu/Cu 无铅钎焊接头剪切强度的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(4): 473-477.
ZHAO Jie, CHI Cheng-yu, CHENG Cong-qian. Effect of Bi addition on shear strength of Sn-3Ag-0.5Cu/Cu solder joints[J]. 2008, 44(4): 473-477.
- [14] MAVOORI H, CHIN J, VAYNMAN S, MORAN B, KEER L, FINE M. Creep, stress relaxation, and plastic deformation in Sn-Ag and Sn-Zn eutectic solders[J]. Journal of Electronic Materials, 1997, 26(7): 783-790.
- [15] KERR M, CHALWA N. Creep deformation behavior of Sn-3.5Ag solder/Cu couple at small length scales [J]. JOM, 2004, 56(6): 50-54.
- [16] 任维丽, 郭建亭, 周继扬. 两相共晶 NiAl-9Mo 合金的蠕变行为[J]. 金属学报, 2002, 38(9): 908-913.
REN Wei-li, GUO Jian-ting, ZHOU Ji-yang. Creep behavior of two-phase NiAl-9Mo eutectic alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(9): 908-913.
- [17] WITKIN D. Creep behavior of bi-containing lead-free solder alloys[J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41(2): 190-203.
- [18] EL-DALY A A, AL-GANAINY G S, FAWZY A, YOUNIS M J. Structural characterization and creep resistance of nano-silicon carbide reinforced Sn-1.0Ag-0.5Cu lead-free solder alloy[J]. Materials and Design, 2014, 55(6): 837-845.

Effect of Bi content on creep properties of Cu/Sn-0.3Ag-0.7Cu/ Cu solder joints

YAO Zong-xiang^{1,2}, LUO Jian¹, YIN Li-meng², WANG Gang², JIANG De-ping³, XIA Wen-tang²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

3. College of Mechanical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The microstructure and creep properties of Bi-doped Cu/Sn-0.3Ag-0.7Cu (SAC0307)/Cu micro-scale solder joints with diameter of 400 μm and height of 200 μm were investigated by optical microscope, scanning electron microscope and dynamic mechanical analysis method. The results show that adding 1% (mass fraction) Bi element into SAC0307 solder leads to the microstructural refinement, larger block of Cu_6Sn_5 , non-uniform distribution of Ag_3Sn and small primary β -Sn grains. While the SAC0307-3Bi solder joints contain relatively smaller sizes of primary β -Sn grains, also the IMCs appear much smaller than the examined joints with low Bi content. The IMC layer at the solder/Cu interface changes from a large up-and-down scallop shape to the straight one. In addition, the creep property of micro-scale solder joints was studied under 80-125 $^\circ\text{C}$ and 8-15 MPa. The activation energy (Q) of solder joints increase from 82.9 kJ/mol to 94.6 kJ/mol, the stress exponent (n) increases from 4.48 to 4.73 when Bi content increases from 1.0% to 3.0% (mass fraction), which indicates the increasing trends of the creep resistance and dominant deformation mechanism of dislocation climb.

Key words: electronic packaging; low-Ag lead-free solder; micro-scale solder joint; creep; mechanical property

Foundation item: Projects(51674056, 51174246) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(CSTC2014JCYJA40009) supported by the Research Program of Frontier and Applied Basic Research of Chongqing, China; Project(AWJ-M15-05) supported by State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, China; Project(CXTDX201601032) supported by Innovation Team Building at Institutions of Higher Education in Chongqing, China

Received date: 2016-01-04; **Accepted date:** 2016-12-09

Corresponding author: YIN Li-meng; Tel: +86-15023730501; E-mail: yeenlm@cqust.edu.cn

(编辑 李艳红)