

液态 Sn-Cu 钎料的黏滞性与润湿行为研究*

赵宁^{1)2)†} 黄明亮¹⁾²⁾ 马海涛²⁾ 潘学民²⁾ 刘晓英²⁾

1) (大连理工大学, 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024)

2) (大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024)

(2012年11月16日收到; 2012年12月24日收到修改稿)

金属熔体的黏度和表面张力都是与液态结构相关的敏感物理性质, 且存在一定的相互关系. 对于微电子封装材料而言, 黏度和表面张力均是影响其工艺性能的重要参量. 本文利用回转振动式高温熔体黏度仪测量了 Sn- x Cu ($x = 0.7, 1.5, 2$) 钎料熔体在不同温度下的黏度值, 发现在一定温度范围内钎料熔体的黏度值存在突变, 可划分为低温区和高温区. 在各温区内, 黏温关系很好地符合 Arrhenius 方程, 在此基础上讨论了液态钎料的结构特征和演变规律. 同时, 利用黏度值计算了液态 Sn- x Cu 钎料在相应温度下的表面张力, 并通过 Sn- x Cu 钎料在 Cu 基板上的润湿铺展实验对计算结果进行验证. 结果显示, 润湿角和扩展率的测试结果与表面张力的计算结果具有很好的一致性, 表明通过熔体黏度值来计算锡基二元无铅钎料合金表面张力并评估其润湿性能的方法是可行的.

关键词: Sn-Cu 钎料, 黏度, 表面张力, 润湿性

PACS: 66.20.-d, 68.08.Bc, 68.03.Cd, 81.20.Vj

DOI: 10.7498/aps.62.086601

1 引言

金属熔体的黏滞性是液态金属原子迁移能力的一种表现, 它反映了原子间结合力的大小, 是重要的熔体敏感物理性质之一^[1], 金属液态结构的改变必然会引起其黏度发生突变^[2-4], 当液态金属中原子分布的有序度降低时, 其黏度也会随之降低. 通过金属熔体黏度的变化也能够得到许多相关的金属液态结构信息, 并可以揭示液态结构及原子间相互作用, 相关研究一直是凝聚态物理研究领域中的热点问题之一.

在微电子封装领域中, 黏度同样是一个重要的材料性能参量, 它影响着底部填充料流动 (underfill flow)、间隙填充 (gap filling) 以及润湿性能 (solderability)^[5-7]. 在封装的工艺过程中, 钎料合金熔化后将润湿焊盘金属和封装引脚, 钎料润湿性能的优劣直接影响着钎焊后焊点的力学性能和电子元器件的可靠性. 已有报道指出, 液态金属的黏度和表面张力之间存在一定的关系, 在测定液态金属

黏度的情况下, 可以通过定量计算获得液态金属在相应温度下的表面张力^[8,9]. 这对于无铅钎料的研究具有重要意义, 因为无铅钎料的表面张力是影响其润湿性、钎焊性能的重要参数, 而对其进行直接测量具有一定的难度. 通过黏度值计算钎料合金表面张力的方法, 无疑为评估无铅钎料的润湿性和可焊性开辟了新的途径.

本课题组前期研究了 Sn-Cu 钎料的液态结构^[10,11], 本文利用回转振动式高温熔体黏度仪测量了 Sn- x Cu ($x = 0.7, 1.5, 2$) 钎料熔体在不同温度下的黏度值, 结合前期工作讨论了液态钎料的结构特征和演变规律. 同时, 利用黏度值计算了液态 Sn- x Cu 钎料在相应温度下的表面张力, 并通过 Sn- x Cu 钎料在 Cu 基板上的润湿铺展实验, 对计算结果进行了验证.

2 实验方法

本文所用钎料合金为 Sn- x Cu ($x = 0.7, 1.5, 2$, wt.%), 由高纯度金属熔炼制得, 其中 Sn 为 99.95%,

* 国家自然科学基金 (批准号: 51171036)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20120041120038) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: DUT11RC(3)56) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhaoning@dut.edu.cn

Cu 为 99.999%. 将熔炼好的合金放入电阻炉中在 $500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下重熔后, 采用石墨和不锈钢模具分别浇铸成 $\Phi 28$ 的圆柱体和 $\Phi 8$ 的圆棒. 然后将圆柱体合金加工成尺寸为 $\Phi 7 \times 48\text{ mm}$ 的试样, 用于高温黏度实验; 将棒状合金加工成尺寸为 $\Phi 5 \times 1.5\text{ mm}$ 的片状试样, 重约 200 mg, 用于润湿铺展实验.

采用 RHEOTRONIC VIII 型回转振动式高温熔体黏度测量 Sn-xCu 钎料的黏度值. 首先将试样置于 Al_2O_3 容器里, 安装到样品室中, 抽真空至 2 Pa, 然后充入高纯氦气 (99.999%) 到 $1.1 \times 10^5\text{ Pa}$, 将排气口打开并置入水槽中, 在整个测量过程中使氦气处于流通状态. 黏度实验采用降温测量方式, 即先将试样以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度加热至最高实验温度, 保温 1 h 后开始进行黏度值的测试, 然后将熔体降温到下一个实验温度, 保温 30 min 后开始黏度测量. 在每一温度点, 重复测量 5 次, 取平均值作为该温度的黏度值. 实验温度分别为 230, 245, 260, 280, 300, 330, 360, 400, 450 和 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

采用 Cu 片作为润湿铺展实验的基板金属, 纯度为 99.9%, 尺寸为 $0.1\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$. 将 Cu 片抛光后放入 5% HCl 水溶液中进行超声清洗 2 min, 然后再用酒精清洗并吹干. 将片状钎料试样表面涂上中性活性助焊剂 (RMA), 放置在同样涂有 RMA 助焊剂的 Cu 片中心位置, 一并放入 DHG-9023A 型电热恒温鼓风干燥箱内进行回流钎焊. 钎焊温度分别为 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, 钎焊时间为 60 s. 将焊点研磨至中心部位并抛光处理, 采用金相显微镜获取整个焊点的显微结构图, 并通过图像分析软件测取焊点两侧接触角的大小及焊点中心处钎料的高度. 对于同一成分的钎料在相同的钎焊条件下, 取两个焊点进行测量, 取其平均值. 扩展率 (spread rate) 的计算公式如下:

$$r_s = 100 \times (D - h) / D, \quad (1)$$

式中, r_s 为扩展率, D 为将钎料片看作球体时的直径 (本研究中为定值), h 为钎焊后钎料的高度.

3 实验结果与讨论

3.1 Sn-xCu 钎料熔体的黏度及液态结构演变

图 1 为不同温度下测得的 Sn-xCu 钎料熔体的

黏度值. 在整个测量范围内, 钎料熔体的黏度值随温度的升高呈下降趋势, 说明钎料中原子分布的有序度在降低. 然而, 对于同一钎料, 其黏度值的变化明显地呈不连续性, 在一定温度范围内存在突变. 弭光宝等 [12] 总结了金属的黏度随温度的变化特性, 其中即包含黏度 - 温度关系曲线的不连续变化. 由图 1 可知, Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 的黏度值发生突变的温度点分别为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而黏度值发生突变的温度范围分别为 $280\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 330\text{ }^{\circ}\text{C}$. 因此, 每条黏温曲线均可被其黏度突变点划分为两个温区, 即低温区 and 高温区. 此外, 当温度低于 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 相同温度下钎料熔体的黏度值随 Cu 含量的增加而增大; 当温度等于或高于 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在相同温度下三种钎料熔体的黏度值差别不大. Mao 等 [13] 的研究同样表明, 在相同的过热度下, 当 Sn 含量高于 25% 时 Cu-Sn 合金的黏度值随 Cu 含量的减少而减小. 钎料熔体黏度值发生突变且随后趋于一致, 则表明钎料液态结构发生演变, 此部分将在后面的分析中进行详细讨论.

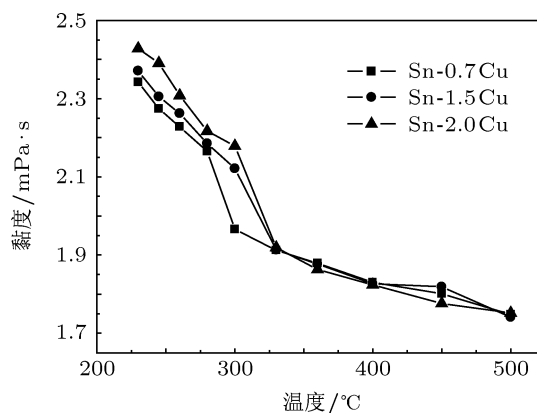


图 1 Sn-xCu 钎料熔体的黏度值与温度的关系

金属熔体的黏度与温度的关系通常可近似地由 Arrhenius 方程进行描述 [2,14]:

$$\eta = \frac{h}{v_m} \exp\left(\frac{\varepsilon}{kT}\right), \quad (2)$$

式中, η 是黏度, h 是普朗克常量, v_m 是流团 (离子、原子或团簇) 尺寸, ε 是黏流活化能 (即流团由一个平衡位置移动到另一个平衡位置所需的活化能), k 是玻尔兹曼常数, T 为绝对温度. 可见, 金属熔体的黏度随温度升高呈指数规律下降. 将 (2) 式两边同时取自然对数, 可得

$$\ln \eta = \ln \frac{h}{v_m} + \frac{\varepsilon}{kT}, \quad (3)$$

显然, $\ln \eta$ 与 $1/T$ 在理论上应成线性变化关系. 图 2 为 Sn-xCu 熔体的 $\ln \eta-1/T$ 关系图. 可以看出, Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 三种钎料的 $\ln \eta-1/T$ 关系都可分为如前所述的低温区和高温区, 其温度范围分别为 23 °C—280 °C 和 300 °C—500 °C, 230 °C—300 °C 和 330 °C—500 °C, 230 °C—300 °C 和 330—500 °C. 杨中喜等 [15] 测量了液态纯 Sn 在 240 °C 到 1050 °C 之间的黏度, 发现根据黏度值的变化可以将整个温度范围划分为低温区、中温区和高温区, 分别为 240 °C—390 °C, 390 °C—810 °C 和 810 °C—1050 °C. 温区范围的差异主要是由 Cu 元素的加入改变了纯 Sn 的液态结构特征而引起的. 对各个温区分别进行线性拟合, 发现在同一温区内 $\ln \eta$ 与 $1/T$ 成较好的线性关系, 如图 2 所示, 说明钎料熔体的黏度随温度的变化趋势很好地符合了 Arrhenius 方程. 各温区的线性拟合结果由表 1 给出.

利用表 1 中的线性拟合结果, 通过 (3) 式可计算出三种钎料合金在不同温区下的黏流活化能 ϵ 和流团尺寸 v_m , 计算结果列于表 2. 对于同一钎料合金, 其低温区的 ϵ 值和 v_m 值均大于高温区的, 说明随温度的升高流团之间相互束缚的能力在下降, 同时流团的尺寸在减小. 在低温区下, ϵ 值和 v_m 值都随钎料中 Cu 含量的增加而增大, 表明钎料熔体中流团或团簇的尺寸随 Cu 含量的增加而增大, 而其移动能力同时在下降; 在高温区下, 三种钎料的 ϵ 值和 v_m 值较为接近.

如前所述, 金属熔体的黏度是一个对液态结构敏感的物理性质, 金属熔体结构的转变最终会导致其黏度发生突变. 在同一温区内, Arrhenius 方程中的 ϵ 和 v_m 是与温度无关的参数, 而是依赖于金属的液态结构和熔体中团簇的尺寸, 它们发生变化是熔体液态结构发生转变的外在反映 [2]. 因此, 在高低温区之间即黏度值发生突变的部分, 钎料熔体中发生了结构转变, 即 Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu

钎料液态结构转变的温度范围分别为 280 °C—300 °C, 300 °C—330 °C 和 300 °C—330 °C.

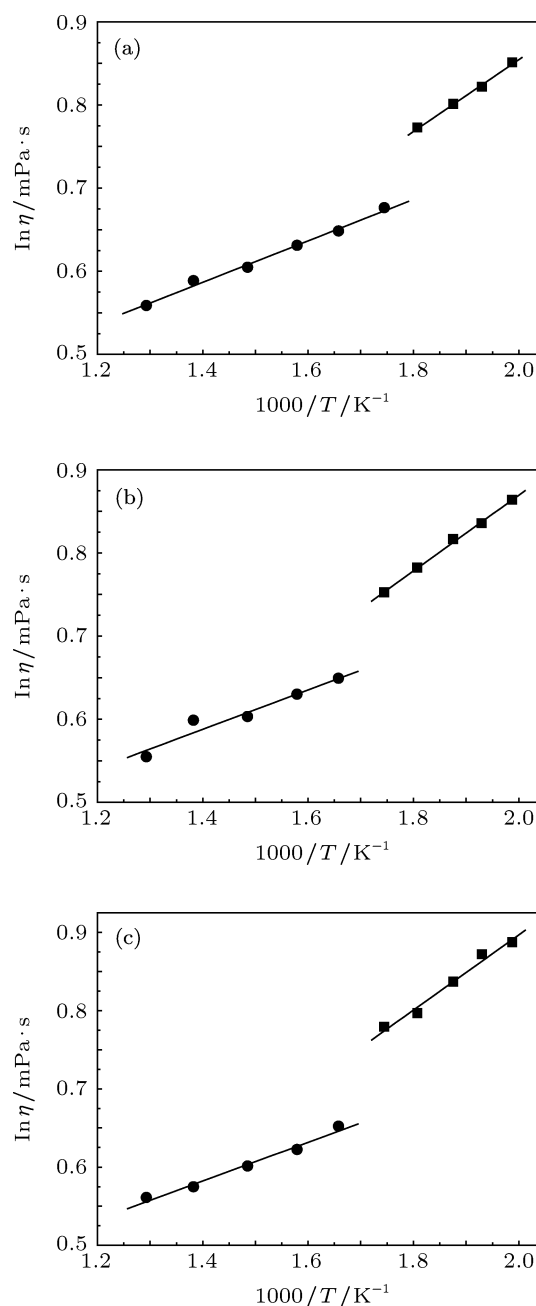


图 2 Sn-xCu 钎料熔体的 $\ln \eta-1/T$ 曲线 (a) Sn-0.7Cu; (b) Sn-1.5Cu; (c) Sn-2Cu

表 1 Sn-xCu 熔体 $\ln \eta-1/T$ 关系各温区的线性拟合结果

钎料合金	温区	线性拟合方程	相关系数	方差
Sn-0.7Cu	低温区	$\ln \eta = -0.00831 + 0.43131/T$	$R = 0.99820$	$S = 0.00243$
	高温区	$\ln \eta = 0.23774 + 0.24924/T$	$R = 0.99604$	$S = 0.00423$
Sn-1.5Cu	低温区	$\ln \eta = -0.04156 + 0.45526/T$	$R = 0.99872$	$S = 0.00256$
	高温区	$\ln \eta = 0.25693 + 0.23634/T$	$R = 0.96950$	$S = 0.01011$
Sn-2Cu	低温区	$\ln \eta = -0.06382 + 0.48023/T$	$R = 0.98968$	$S = 0.00772$
	高温区	$\ln \eta = 0.23586 + 0.24793/T$	$R = 0.99106$	$S = 0.00564$

表2 Sn-xCu 钎料熔体不同温区下的 ϵ 和 v_m 值

钎料合金	低温区		高温区	
	ϵ/eV	$v_m/10^{-25} \text{ cm}^3$	ϵ/eV	$v_m/10^{-25} \text{ cm}^3$
Sn-0.7Cu	0.0372	6.681	0.0215	5.224
Sn-1.5Cu	0.0393	6.907	0.0204	5.125
Sn-2Cu	0.0414	7.063	0.0214	5.234

本课题组前期研究了 Sn-xCu 钎料的液态结构,发现 Sn-0.7Cu 和 Sn-1.5Cu 熔体中只存在短程有序 (short-range order, SRO) 结构,而在 Sn-2Cu 熔体中不仅测取到了 SRO 结构,还测取到了中程有序 (medium-range order, MRO) 结构,并且发现该 MRO 结构与熔体中存在的 Cu_6Sn_5 团簇相关,但此种 MRO 结构在温度高于 330°C 时消失^[10,11,16].由此可见,三种钎料的 v_m 在低温区内的差别主要也是由其液态结构上的差别所决定的.在低温区内,Sn-2Cu 熔体中存在 MRO 结构,而且具有最大的相关半径 (r_c),因此其 v_m 值也最大;另外,Sn-xCu 钎料熔体中 Cu_6Sn_5 团簇的数量和尺寸都会随着 Cu 含量的增加而增大,因而钎料的 v_m 值也随 Cu 含量的增加而增大,这降低了流团的运动能力即提高了黏流活化能 ϵ ,进而熔体的黏度值也随之增加.而在高温区内,熔体中的 Cu_6Sn_5 团簇遭到破坏,这三种钎料的液态结构接近于纯 Sn 的液态结构^[16],因此它们的黏度值也相差不大, ϵ 值和 v_m 值也非常接近.综上,Sn-xCu 钎料熔体黏度的突变是由其液态结构的转变引起的.

3.2 Sn-xCu 钎料的表面张力计算与润湿行为研究

当金属完全熔化后会形成一个新的表面,该表面内部的原子之间便要相互作用做功以克服原子间的偶势 $\phi(r)$,做功的大小取决于液态金属中近邻原子的分布,即原子间的双体分布函数 $g(r)$.同样,液态内部原子的扩散也需要做功克服原子间的 $g(r)$.因此,表面张力和黏度是相互联系的^[17].假设在一元系中,气相的浓度为零(即气相为真空),则表面张力的表达式可表示为^[18]

$$\gamma = \frac{\pi n^2}{8} \int_0^\infty g(r) \frac{\partial \phi(r)}{\partial r} r^4 dr, \quad (4)$$

式中, γ 为表面张力, n 为原子数密度.

同样,利用分子动力学理论也可以给出黏度的

表达式^[18]:

$$\eta = \sqrt{\frac{m}{kT}} \frac{2\pi n^2}{15} \int_0^\infty g(r) \frac{\partial \phi(r)}{\partial r} r^4 dr, \quad (5)$$

式中, m 为原子的质量, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度.

由 (4) 和 (5) 式可以得到表面张力和黏度的关系式如下:

$$\frac{\gamma}{\eta} = \frac{15}{16} \sqrt{\frac{kT}{m}}. \quad (6)$$

Egry 等^[8,9] 利用已有液态金属 (如 Fe, Co, Ni, Cu, Ag 和 Au 等) 的表面张力和黏度数据对 (6) 式进行了检验,发现在金属熔点左右大约 300 K 的范围内具有较好的一致性.本文所研究的三种 Sn-Cu 钎料中 Cu 组元的含量较少,可以近似地看成纯金属;所选取的温度均在 (6) 式所适用的范围内,因此通过 Sn-xCu 钎料的黏度值计算其表面张力是可行的.首先,根据钎料中 Sn 和 Cu 的摩尔百分比,计算出 Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 的平均原子质量分别为 1.959×10^{-25} , 1.946×10^{-25} 和 $1.938 \times 10^{-25} \text{ kg}$.然后利用 (6) 式计算出三种钎料在各个温度下的表面张力值,结果如图 3 所示.可以看出,三种钎料的表面张力都先随着温度的升高而降低,达到一定值后又开始略有升高. Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 表面张力出现最低点的温度分别为 330°C , 330°C 和 360°C .如果仅从润湿性的角度来考虑,上述温度为各钎料合金最佳的钎焊温度.值得注意的是,Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 三种钎料的表面张力值分别在 280°C — 300°C , 300°C — 330°C 和 300°C — 330°C 温度范围内有显著地降低,并与各自黏度发生突变的温度范围相对应,且突变之后三种钎料的表面张力值相差不大.这表明,Sn-xCu 钎料的表面张力与其液态结构之间同样存在密切的关系.

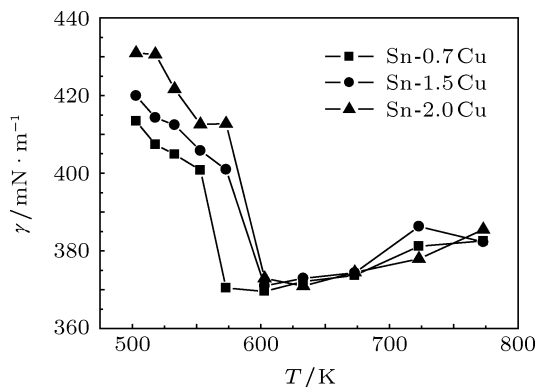


图3 不同温度下 Sn-xCu 钎料的表面张力计算结果

钎料合金在基板金属上的润湿性能是影响钎焊效果及可靠性的一个重要性能指标, 其润湿程度可用钎料与基板之间的润湿角(接触角)或钎料在基板上的扩展率来表征, 润湿角越小或扩展率越大, 则钎料的润湿性能越好. 通常情况下, 润湿角同扩展率之间存在相互对应关系, 即润湿角越小则扩展率就越高. 根据 Young-Dupre 方程, 润湿角可由焊点体系中各界面的表面张力之间实现平衡来决定^[19]:

$$\gamma_{gs} = \gamma_s + \gamma_{gl} \cos \theta, \quad (7)$$

式中, θ 为润湿角, γ_{gs} 是基板与所处环境之间的表面张力, γ_s 是基板与液态钎料之间的表面张力, γ_{gl} 是液态钎料在相同环境下的表面张力.

在本研究中, 三种 Sn-xCu/Cu 焊点的 γ_{gs} 值和 γ_s 值分别是相同的. 根据 (7) 式可知, Sn-xCu 钎料与基板之间的润湿角的大小主要由钎料各自的表面张力所决定, 即表面张力越低, 其润湿角越小, 而扩展率越高. 为了验证表面张力计算结果的正确性, 本文从扩展率和润湿角两个方面考察了 Sn-xCu 钎料在 Cu 基板上的润湿行为. 图 4 为根据 (1) 式计算得到的 260 °C 下 Sn-xCu 钎料在 Cu 基板上钎焊 60 s 后的扩展率. Sn-0.7Cu 钎料具有最大的扩展率, 而 Sn-2Cu 钎料的扩展率最低, 这与表面张力的计算结果相一致, 如图 3 所示. 这同时也说明, 对于 Sn-Cu 钎料而言, 在实际的钎焊工艺温度(约为 250 °C—260 °C)下, 钎料的润湿性能随钎料中 Cu 含量的增加而呈下降的趋势.

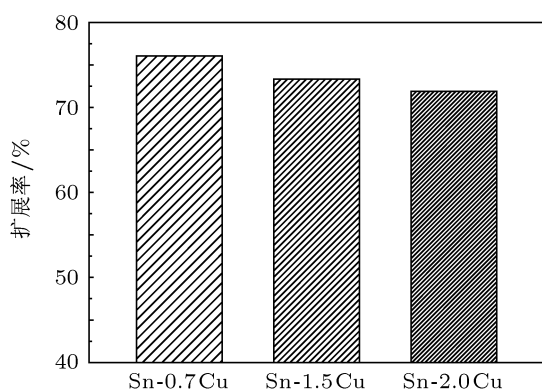


图 4 260 °C 下 Sn-xCu 钎料在 Cu 基板上钎焊 60 s 后的扩展率

图 5 分别给出了 260 °C 和 360 °C 下 Sn-xCu 钎料在 Cu 基板上钎焊 60 s 后的润湿角. 可见, 在

260 °C 钎焊时, 如图 5(a) 所示, Sn-xCu/Cu 焊点的润湿角随钎料中 Cu 含量的增加而增大, 这与扩展率的实验结果相一致; 当钎焊温度为 360 °C 时, 如图 6(b) 所示, Sn-xCu/Cu 焊点的润湿角相差不大, 均在 26°—27° 之间, 但与 260 °C 钎焊时的润湿角相比, 有较大幅度的降低. 由前面表面张力的计算结果可知, 在 260 °C 下, Sn-xCu 钎料的表面张力同样随 Cu 含量的增加而增大, 而在 360 °C 时, 三种钎料的表面张力相差不大, 但较 260 °C 时的表面张力要小得多, 见图 3. 由于 Sn-xCu/Cu 焊点润湿角的大小主要由液态钎料的表面张力所决定, 因此润湿角的实验结果与表面张力的计算结果相一致. 此外, 可以看出 Sn-xCu 钎料的润湿角在一定温度范围内随钎焊温度的升高而降低, 在不影响其他工艺性能的情况下可通过提高工艺温度来改善钎料的润湿性能.

综上所述, Sn-xCu 钎料润湿性能(扩展率和润湿角)的测量结果很好地验证了表面张力计算结果的可信性, 表明通过熔体黏度值来计算锡基二元无铅钎料合金表面张力并评估其润湿性能的方法是可行的.

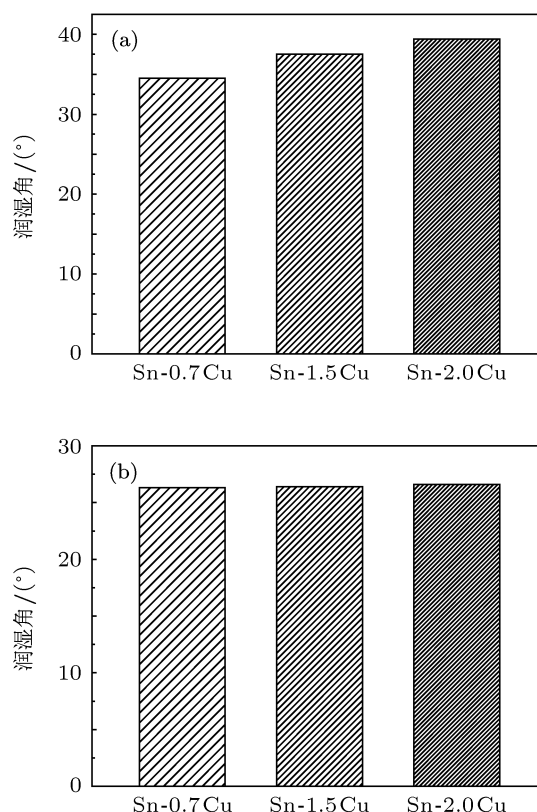


图 5 Sn-xCu 钎料在 Cu 基板上钎焊 60 s 后的润湿角 (a) 260 °C; (b) 360 °C

4 结论

Sn-0.7Cu, Sn-1.5Cu 和 Sn-2Cu 三种钎料熔体的黏度值随温度的升高呈下降趋势, 但分别在 280—300 °C, 300—330 °C 和 300—330 °C 的温度范围内发生突变, 进而黏温关系曲线均出现低温区和高温区. 在各温区内, 黏温关系很好地符合了 Arrhenius 方程. 在低温区内, ε 值和 v_m 值都随钎料中 Cu 含量的增加而增大; 在高温区内, 三种钎料的 ε 值和 v_m 值较为接近. Sn-xCu 钎料熔体黏度的突变及 ε 值和 v_m 值变化主要是由其液态结构的转变引起的. 利用黏度值计算了液态 Sn-xCu 钎料在相应温

度下的表面张力, 并通过 Sn-xCu 钎料的润湿行为研究对计算结果进行验证. 在低温 (260 °C) 下, 随 Cu 含量的增加, Sn-xCu 钎料的扩展率降低、润湿角增大; 在高温 (360 °C) 下, 三种钎料的润湿角相差不大. 润湿性能的测试结果很好地符合了表面张力的计算结果, 表明通过熔体黏度值来计算锡基二元无铅钎料合金表面张力并评估其润湿性能的方法是可行的.

感谢山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室刘建同高工在高温黏度实验与分析方面给予的帮助.

- [1] Geng H R, Sun C J, Yang Z X, Wang R, Ji L L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1320 (in Chinese) [耿浩然, 孙春静, 杨中喜, 王瑞, 吉蕾蕾 2006 物理学报 **55** 1320]
- [2] Hou J X, Guo H X, Zhan C W, Tian X L, Chen X C 2006 *Mater. Lett.* **60** 2038
- [3] Mi G B, Li P J, Ohapkin A V, Konstantinova N Yu, Sabirzianov A A, Popel P S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 056601 (in Chinese) [弭光宝, 李培杰, Ohapkin A V, Konstantinova N Yu, Sabirzianov A A, Popel P S 2011 物理学报 **60** 056601]
- [4] Sun M H, Geng H R, Bian X F, Liu Y 2000 *Acta Metall. Sin.* **36** 1134 (in Chinese) [孙民华, 耿浩然, 边秀房, 刘燕 2000 金属学报 **36** 1134]
- [5] Wang J L 2002 *Microelectron. Reliability* **42** 293
- [6] Sun Y Y, Zhang Z Q, Wong C P 2005 *Macromol. Mater. Eng.* **290** 1204
- [7] Wei X Q, Zhou L, Huang H Z, Xiao H B 2005 *Mater. Lett.* **59** 1889
- [8] Egrý I, Lohöfer G, Sauerland S 1993 *J. Non-Cryst. Solids* **156–158** 830
- [9] Egrý I 1993 *Scripta Metall. Mater.* **28** 1273
- [10] Zhao N, Pan X M, Ma H T, Wang L 2008 *Acta Metall. Sin.* **44** 467 (in Chinese) [赵宁, 潘学民, 马海涛, 王来 2008 金属学报 **44** 467]
- [11] Zhao N, Pan X M, Ma H T, Dong C, Guo S H, Lu W, Wang L 2008 *J. Phys. Confer. Ser.* **98** U141
- [12] Mi G B, Li P J, Ohapkin A V, Konstantinova N Yu, Sabirzianov A A, Popel P S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046601 (in Chinese) [弭光宝, 李培杰, Ohapkin A V, Konstantinova N Yu, Sabirzianov A A, Popel P S 2011 物理学报 **60** 046601]
- [13] Mao T, Bian X F, Xue X Y, Zhang Y N, Guo J, Sun B A 2007 *Physica B* **387** 1
- [14] Nishimura S, Matsumoto S, Terashima K 2002 *J. Cryst. Growth* **237–239** 1667
- [15] Yang Z X, Geng H R, Tao Z D, Sun C J 2004 *J. At. Mol. Phys.* **21** 663 (in Chinese) [杨中喜, 耿浩然, 陶珍东, 孙春静 2004 原子分子物理学报 **21** 663]
- [16] Zhao N 2008 *Ph. D. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [赵宁 2008 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [17] Teng X Y, Min G H, Liu H L, Shi Z Q, Wang H R, Ye Y F 2001 *Mater. Sci. Technol.* **9** 383 (in Chinese) [腾新营, 闽光辉, 刘含莲, 石志强, 王焕荣, 叶以富 2001 材料科学与工艺 **9** 383]
- [18] Iida T, Roderick I L 1993 *The Physical Properties of Liquid Metals* (Oxford: Clarendon Press)
- [19] Abteu M, Selvaduray G 2000 *Mater. Sci. Eng. R* **27** 95

Viscosities and wetting behaviors of Sn-Cu solders^{*}

Zhao Ning^{1)2)†} Huang Ming-Liang¹⁾ Ma Hai-Tao²⁾
Pan Xue-Min²⁾ Liu Xiao-Ying²⁾

1) (Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

2) (School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 16 November 2012; revised manuscript received 24 December 2012)

Abstract

The viscosity and surface tension of metal melt are all sensitive physical properties that relate to the liquid structure and also have a certain correlation between them. For electronic packaging materials, both viscosities and surface tensions are very important parameters affecting the processing properties. In this study, the viscosities of Sn- x Cu ($x = 0.7, 1.5, 2$) solder melts are measured by using a torsional oscillation high-temperature viscometer. Abrupt change in viscosity occurs in a certain range of temperature. The temperature range can accordingly be divided into a low temperature zone and a high temperature zone. The relationship between viscosity and temperature can fit to the Arrhenius equation very well in each temperature zone. The structure characteristics and evolutions of the liquid solders are then discussed. Meanwhile, the surface tensions of the Sn- x Cu solders are calculated according to the viscosity values at the corresponding temperatures. The test results of the wetting angle and the spreading rate are in good agreement with the calculations, indicating that the method of using the viscosity values to calculate the surface tensions of binary lead-free solder alloys and evaluate their wettabilities is feasible.

Keywords: Sn-Cu solder, viscosity, surface tension, wettability

PACS: 66.20.-d, 68.08.Bc, 68.03.Cd, 81.20.Vj

DOI: 10.7498/aps.62.086601

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51171036), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120041120038), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. DUT11RC(3)56).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaoning@dlut.edu.cn