

回流时间对Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点界面金属间化合物生长行为的影响

袁鑫^{1, 2}, 张宁², 孔子斌^{1, 2}

1. 盐城工学院机械工程学院江苏盐城 224051

2. 徐州工程学院机电工程学院江苏徐州 221018

摘要: 通过瞬时液相扩散焊工艺制备Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu复合焊点, 采用扫描电镜和能谱仪研究回流时间对Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点界面金属间化合物(IMC)组织形貌和生长动力学的影响。结果表明: 在回流温度不变的情况下, Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点界面金属间化合物层厚度与回流时间正相关, 随着回流时间增加, Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点金属间化合物层厚度逐渐增加, 焊点金属间化合物的形貌由锯齿状向扇贝状转变。当回流时间为12h时, 冷热两端金属间化合物生长到一起, Sn元素在钎料基体中的完全反应导致Cu₆Sn₅相转变为Cu₃Sn相, 相变引起的体积收缩使焊缝产生缺陷。冷端金属间化合物的生长速度大于热端, 冷热两端金属间化合物的扩散系数分别为0.568μm²/h和0.019μm²/h。冷端金属间化合物的生长处于反应控制阶段, 金属间化合物的生长受Cu原子扩速率影响, 热端金属间化合物的生长处于晶界扩散控制阶段, 金属间化合物的生长受Cu原子穿越晶界速率的影响, 生长极为缓慢。焊接接头的抗剪强度由34.54MPa降至20.99MPa, 降低了39.2%。

关键词: 金属间化合物; 显微组织; 瞬时液相扩散焊; 焊点

The effect of reflow time on the growth behavior of intermetallic compounds at the interface of Sn0.3Ag0.7Cu/Cu solder joints

YUAN Xin^{1, 2}, ZHANG Ning², KONG Zibin^{1, 2}

1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, Jiangsu, China

Abstract: Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu composite solder joints were prepared by transient liquid phase diffusion bonding process. The effects of reflow time on the microstructure and growth kinetics of intermetallic compounds at the interface of Sn0.3Ag0.7Cu/Cu solder joints were studied by scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. The results show that the thickness of intermetallic compound (IMC) at the interface of Sn0.3Ag0.7Cu/

基金项目: 江苏省产学研合作项目(BY20230206); 徐州市科技计划项目(KC23313、KC23404); 徐州工程学院重大培育项目(2024)。

第一作者: 袁鑫, 硕士研究生, 主要从事电子封装研究工作, E-mail: a2320314427@163.com。

通信作者: 张宁, 副教授, 博士, 主要从事增材制造、金属基复合材料材料与连接技术的研究工作, E-mail: sprningzn@126.com。

Cu solder joint is positively correlated with the reflux time when the reflux temperature is constant. With the increase of reflux time, the thickness of IMC layer in Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu solder joint increases gradually, and the morphology of intermetallic compound in solder joint changes from serrated to scalloped. When the reflow time is 12h, the IMC grow together at the hot and cold ends. The complete reaction of Sn element in the solder matrix leads to the transformation of Cu_6Sn_5 phase into Cu_3Sn phase, and the volume shrinkage caused by the phase transformation causes defects in the weld. The growth rate of IMC at the cold end is greater than that at the hot end. The diffusion coefficients of IMC at the cold and hot ends are $0.568\mu\text{m}^2/\text{h}$ and $0.019\mu\text{m}^2/\text{h}$, respectively. The growth of the cold end IMC is in the reaction control stage, the growth of the IMC is affected by the diffusion rate of Cu atoms, and the growth of the hot end IMC is controlled by grain boundary diffusion. The growth of IMC is affected by the rate of Cu atoms passing through the grain boundary, and the growth is extremely slow. The shear strength of the welded joint was reduced from 34.54MPa to 20.99MPa, which was reduced by 39.2%.

Keywords: intermetallic compounds; microstructure; transient liquid phase diffusion welding; solder joint

1 序言

随着智能驾驶、AI等新兴产业的崛起,电子产品对尺寸、性能、可靠性等要求越来越高,这对能够支撑和保护芯片的封装技术提出了更高要求^[1-3]。传统的二维平面封装技术由于自身的局限性,已经不能满足更高密度的封装要求,因而开发先进的封装技术迫在眉睫。3D封装采用瞬时液相扩散焊(Transient Liquid Phase Diffusion Bonding, TLP Bonding)工艺,通过多次回流形成金属间化合物(IMC)焊点,能够有效实现芯片的堆叠互连,显著提高芯片性能和传输效率。瞬时液相扩散焊是3D封装的核心技术之一^[4, 5],其制备的焊点通常会有Kirkendall空洞和应力集中两个缺点。这两个缺点会严重影响芯片堆叠互连的可靠性^[6]。因此,研究金属间化合物在瞬时液相扩散焊焊点中的生长行为及Kirkendall空洞的形成原因,对制备更高性能的瞬时液相扩散焊焊点至关重要。

Sn基钎料由于能够和铜反应生成高熔点的 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 金属间化合物,可避免多次回流导致的焊点塌陷。因而,Cu/Sn基钎料/Cu系统是瞬时液相扩散焊工艺中最常使用的系统之一^[7, 8]。WANG等^[9]研究了在Sn-3.0Ag-0.5Cu焊料中加入适量的Ni颗粒对瞬时液相扩散焊结合的影响,发现添加Ni颗粒可以细化金属间化合物的晶粒结构。BAO等^[10]研究了Cu/Sn-0.3Ag-0.7CuAg/Cu焊点在老化过程中的微观结构演变和可靠性。结果表明,随着时间的增加,焊点中会产生包括Kirkendall空腔在内的孔洞,经检测发现含有Ag粉末的焊接接头具有较高

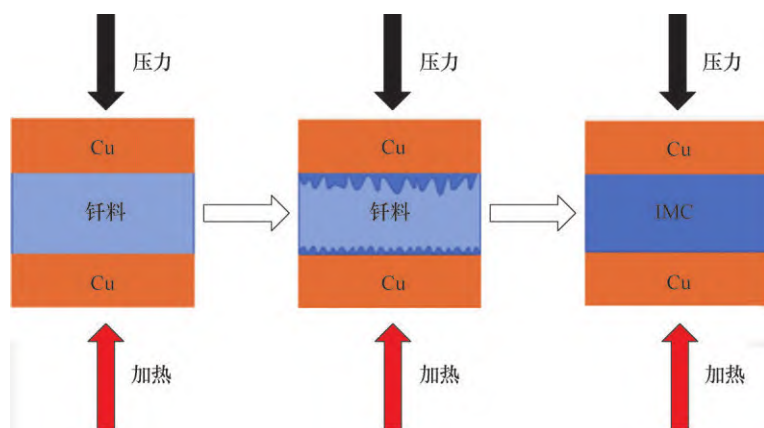
的可靠性。GUO等^[11]研究发现,向纯Sn焊料中添加Ni颗粒可以细化金属间化合物晶粒,并提高焊点的剪切强度。周晖淳等^[12]研究了回流时间对纯铜基板Sn0.3Ag0.7Cu钎料钎焊焊点组织和力学性能的影响,发现冷端 Cu_6Sn_5 生长速度大于热端是由温度梯度引起的。回流时间为5h时,焊缝形成全金属间化合物,断裂模式由塑性断裂最终演变为脆性断裂。

本文针对Sn0.3Ag0.7Cu复合钎料,研究回流时间对钎料焊点界面金属间化合物组织形貌和生长动力学的影响。分析了冷热两端金属间化合物的生长机理,计算出冷热两端金属间化合物的扩散系数和生长动力学指数,研究了金属间化合物层厚度对焊点剪切强度的影响。

2 试验材料与方法

本试验采用深圳华建生产SC0307型Sn0.3Ag0.7Cu钎料,纯铜基板($w_{\text{Cu}}=99.99\%$)的尺寸为 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。焊前用砂纸将铜片表面的氧化膜去除,然后将铜片放入超声波清洗仪中,分别用丙酮和无水乙醇超声波清洗5min,将铜片表面杂质洗去。采用瞬时液相扩散焊法制备Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点。将涂抹焊膏的铜片置于热压机内加热,加热温度为 250°C ,回流时间分别为0h、1h、2h、4h、8h、12h。达到加热时间后关闭热压机,样品自然冷却至室温后取出,焊接原理及设备如图1所示。

采用环氧树脂镶嵌样品,冷置后进行研磨、抛光、蚀刻处理。腐蚀液为5%硝酸+95%酒精,



a) 焊接原理



b) 焊接设备

图1 瞬时液相扩散焊接原理及设备

用胶头滴管将腐蚀液滴在样品表面，静置5s后将腐蚀液洗掉。采用扫描电子显微镜（SEM）和能谱仪（EDS）对焊点的形貌进行分析和观察。采用CMT5105万能试验机测试焊接接头的剪切性能，焊接接头的尺寸为30mm×3mm×1mm，试验机拉伸速率为1mm/min，对不同回流时间的剪切试样测量3组数据取平均值。采用Image-J软件对金属间化合物层的厚度进行测量。

金属间化合物层厚度测量公式为

$$h = s/l \quad (1)$$

式中 h ——金属间化合物层的平均厚度（ μm ）；

s ——金属间化合物层的面积（ μm^2 ）；

l ——金属间化合物层的长度（ μm ）。

重复测量后取平均值得到最终结果。

3 结果与分析

3.1 界面金属间化合物的微观形貌

图2所示为Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu的3D封装焊点在250℃下回流0h、1h、2h、4h、8h、12h后界面金属间化合物的SEM图像。在瞬时液相扩散焊接过程中，Sn0.3Ag0.7Cu钎料与上下Cu基板的反应为



当回流时间为0h时（见图2a），Cu基板中Cu原子扩散至界面金属间化合物层与Sn原子初步发生反应，一层薄薄的锯齿状金属间化合物层连接上（冷端）和下（热端）Cu基板，焊缝从上至下依次为 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Sn}/\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ，其中 Cu_6Sn_5 厚度约为5.04 μm ，所占焊缝比例为27.70%。当回流时间为1h时（见图

2b），焊缝界面呈现双层金属间化合物结构。根据图3所示的EDS分析结果，金属间化合物层主要由大量的 Cu_6Sn_5 和少量的 Cu_3Sn 金属间化合物组成，Cu原子和Sn原子快速反应Sn层明显变薄。此时可以观察到焊点两端的金属间化合物层生长不对称，冷端的金属间化合物层厚度明显大于热端，其中冷端金属间化合物层厚度为9.37 μm ，热端为5.95 μm 。这是因为下Cu基板与热源直接接触，导致焊点两端有一定的温度梯度。受温度梯度的影响，部分热端的Cu原子扩散至冷端Sn/ Cu_6Sn_5 界面，导致冷端Cu原子的浓度增加，冷端界面形成大量Cu-Sn团簇促进 Cu_6Sn_5 的生长，热端由于部分Cu原子迁移至冷端，较少的Cu原子抑制热端 Cu_6Sn_5 的生长^[13]。当回流时间为2h时（见图2c），金属间化合物层的生长进一步消耗Sn原子，焊缝中Sn层的厚度进一步变薄，金属间化合物层由扁平的扇贝状向陡峭的扇贝状转变，此时金属间化合物占焊缝面积的比例为52.75%。当回流时间为4h时（见图2d），冷端和热端的金属间化合物层继续生长，上下两端的 Cu_6Sn_5 趋于接触。当回流时间为8h时（见图2e），两端的部分金属间化合物开始熔合，部分钎料基体仍存在于焊点中，此时测得冷端金属间化合物厚度为48.95 μm ，热端为9.29 μm ，同时金属间化合物占焊缝面积进一步增大为58.23%。当回流时间为12h时（见图2e），焊缝中Sn原子完全与Cu原子反应生成金属间化合物，形成Cu/ $\text{Cu}_3\text{Sn}/\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}_3\text{Sn}/\text{Cu}$ 多层结构焊点，此时冷端金属间化合物/Cu层相对热端较为平坦，这是因为较高的Cu原子浓度和较厚的金属间化合物层抑制冷端铜基板的溶解，热端Cu基板加速熔解是Cu原子

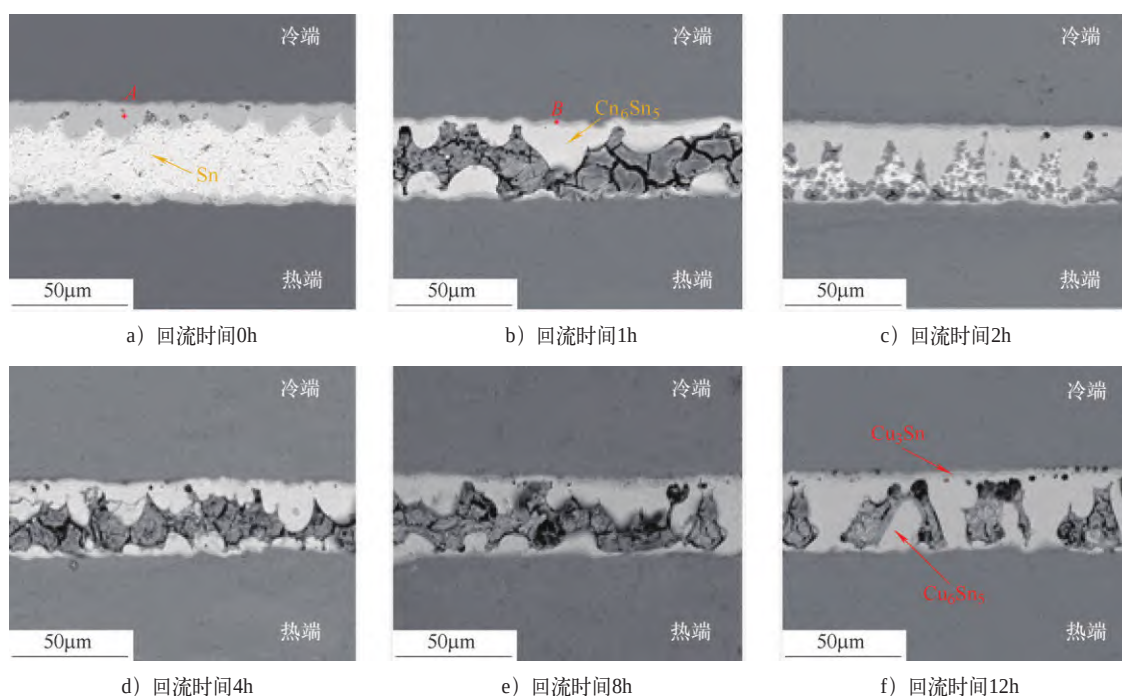


图2 Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点在250℃不同回流时间条件下的SEM图像

热迁移引起的，Cu基板与 Cu_3Sn 金属间化合物层连接处的形状变得凹凸不平。

3.2 金属间化合物生长动力学分析

液态钎料与基板形成的金属间化合物受基板中金属元素扩散的控制，界面金属元素的扩散和反应共同决定金属间化合物的生长。金属间化合物的生长过程主要分为3个阶段：反应控制阶段、体扩散控制阶段和晶界扩散控制阶段^[14]。

Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点冷端和热端界面金属间化合物层厚度随回流时间的变化如图4所示。当回流时间为0h时，焊点冷热两端界面金属间化合物层的厚度无明显差异，这是由于加热时间较短，热

端Cu原子扩散距离有限，未迁移至冷端 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Sn}$ 界面处与Sn原子反应，故而冷端和热端金属间化合物厚度无明显改变。随回流时间的增加，冷端金属间化合物层厚度高于热端，当回流时间达到8h后，Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点冷端和热端界面金属间化合物层厚度分别为 $47.55\mu\text{m}$ 和 $9.29\mu\text{m}$ 。经过12h回流，焊接的试样两端界面金属间化合物已经粘连在一起，无法区分冷热端，进而无法单独计算界面金属间化合物的平均厚度，因此采用计算金属间化合物面积占比的方式来分析其生长情况。

为进一步分析Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点冷热两端金属间化合物的生长机理，研究金属间化合物的

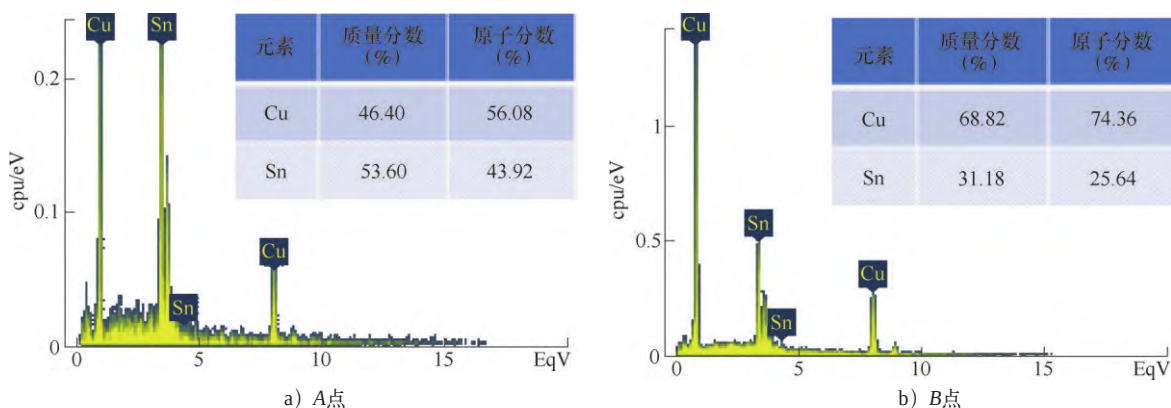


图3 图2中A点和B点的EDS分析结果

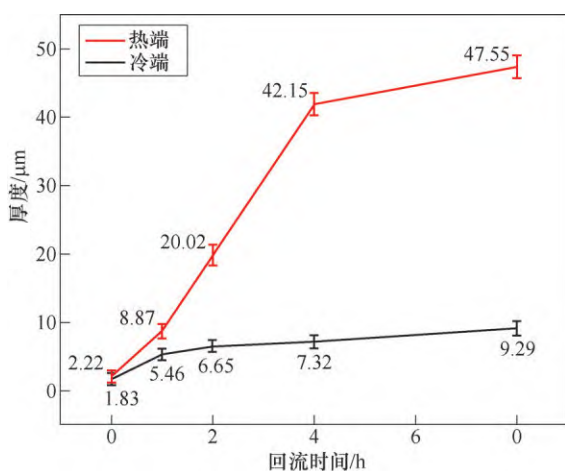


图4 Cu/Sn0.3Ag0.7Cu焊点冷端和热端界面金属间化合物层厚度随回流时间的变化关系

生长动力学。参考相关文献，对冷热两端界面金属间化合物的平均生长厚度和回流时间的平方根进行拟合，金属间化合物层厚度与回流时间成正相关，大致的关系式为

$$X_0 = X + \sqrt{Dt} \quad (4)$$

式中 t ——回流时间 (h)；

X ——经过回流时间 t 焊接后的界面金属间化合物层厚度 (μm)；

X_0 ——通过线性拟合计算出的金属间化合物层厚度 (μm)；

D ——扩散系数 ($\mu\text{m}^2/\text{h}$)。

Cu/Sn0.3Ag0.7Cu焊点金属间化合物层厚度与回流时间的平方根关系如图5所示。

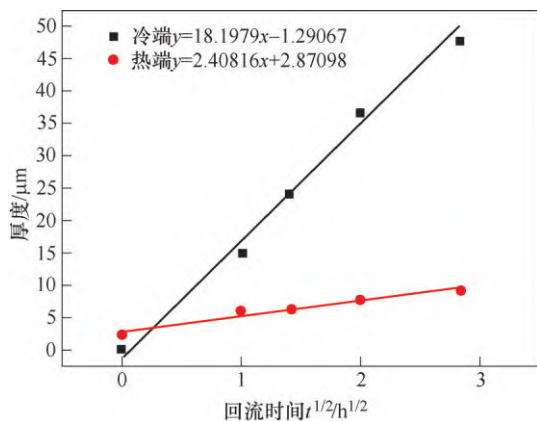


图5 Cu/Sn0.3Ag0.7Cu /Cu焊点金属间化合物层厚度与回流时间的平方根关系

通过图5可得出金属间化合物的生长规律方程为

$$X = 18.1979\sqrt{t} - 1.29067 \quad (5)$$

$$X = 2.40816\sqrt{t} + 2.87098 \quad (6)$$

由式 (4)、式 (5) 可知，当 $t = 8\text{h}$ 、 $X_0 = 50.18\mu\text{m}$ 、 $X = 48.05\mu\text{m}$ 时，可以计算出扩散系数为 $0.567\mu\text{m}^2/\text{h}$ ，同样的方法可以计算出热端的扩散系数为 $0.019\mu\text{m}^2/\text{h}$ 。由此可知，冷端金属间化合物的扩散系数远高于热端，造成这种现象的原因是温度梯度引起的热扩散现象。冷端的温度相对较低，原子的热运动较少，扩散行为更倾向于遵循浓度梯度驱动，浓度梯度是扩散的驱动力，使得冷端的原子扩散更加活跃，扩散系数相对较高。热端的高温会导致更多的热运动和随机运动，减弱了浓度梯度对扩散的驱动作用，因此扩散系数较低。

采用下列公式表示冷热两端金属间化合物层的生长过程，即

$$h = Kt^n \quad (7)$$

式中 h ——回流后界面金属间化合物的层厚度 (μm)；

t ——回流时间 (h)；

n ——生长动力学指数，取值为 $0 \sim 1$ ；

K ——界面金属间化合物的生长速率。

界面金属间化合物的生长速率 K 可以用下式来表示，即

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (8)$$

式中 Q ——活化能 (kJ/mol)；

K_0 ——相互扩散常数 (m^2/s)；

R ——气体常数 [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]；

T ——绝对温度 (K)。

由式 (7)、式 (8) 可得出

$$\ln h = \ln K_0 - \frac{Q}{RT} + n \ln t \quad (9)$$

其中， $\ln K_0 - \frac{Q}{RT}$ 可视为常数，把 $\ln t$ 和 $\ln h$ 作为自变量和因变量，此时直线斜率 n 为金属间化合物的生长动力学指数。

根据相关文献报道，钎料焊点界面金属间化合物的生长机制分为3种^[15]。反应控制阶段：金属间化合物层的生长速率受原子扩散速率的影响，生长动力学指数 $n = 1$ ，此阶段金属间化合物层的生长较快；体扩散控制阶段：此阶段金属间化合物层的生长受Cu原子到达Cu/Cu₆Sn₅界面速率的影响，生长缓慢，生长动力学指数 $n = 1/2$ ；晶界扩散控制阶段：当 $n = 1/3$ 时，界面金属间化合物层的生长受Cu原子穿越晶界速率的影响，生长极为缓慢。图6所示为

Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点金属间化合物层厚度与回流时间的对数拟合曲线。冷端金属间化合物的生长动力学指数 $n=0.95$, 接近1, 说明Cu原子扩速率影响冷端金属间化合物的生长。热端金属间化合物的生长系数 $n=0.323$, 接近1/3, 说明晶界扩散控制热端金属间化合物的生长。由于温度梯度的存在, Cu原子的热迁移导致冷热两端Cu原子浓度的巨大差异, 因此冷端金属间化合物的生长速度必然大于热端。

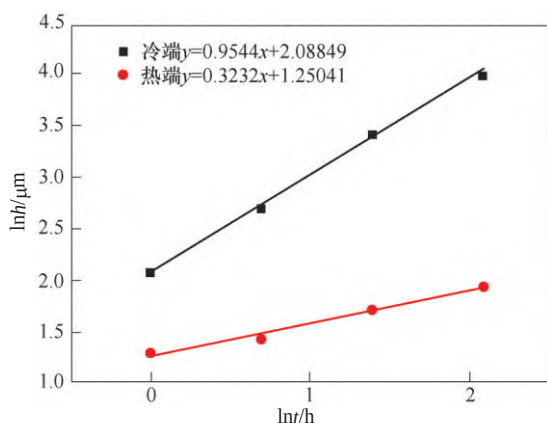


图6 Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点金属间化合物层厚度与回流时间的对数拟合曲线

通过计算金属间化合物面积在焊缝中的占比来研究回流时间12h后冷热两端金属间化合物的生长情况。采用Image-J软件测量出钎焊接头焊缝面积和金属间化合物面积, 并计算出金属间化合物的面积比例。图7所示为250℃下不同回流时间Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点中金属间化合物的面积占比。总体来看, 随着回流时间的增加, 金属间化合物占焊缝面积的比例逐渐变大。当回流时间为0~2h时,

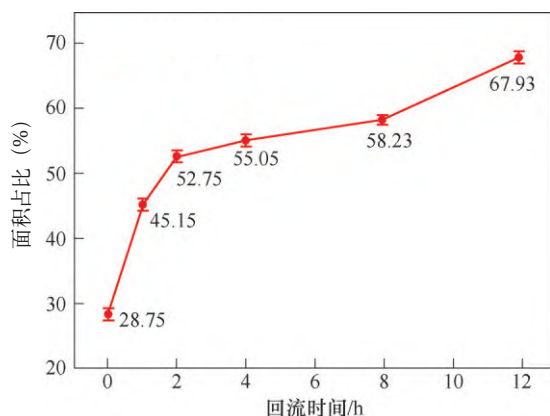


图7 250℃下回流焊接Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点中金属间化合物的面积占比

金属间化合物的生长速率较快; 当回流时间为2~8h时, 金属间化合物的生长速率开始变缓; 当回流时间为8~12h时, 金属间化合物的生长速率再次变快, 金属间化合物的生长速率随回流时间的增加呈先升后降再缓慢上升的趋势。

3.3 回流时间对焊点抗剪强度的影响

图8所示为不同回流时间下Sn0.3Ag0.7Cu钎料焊点的抗剪强度。随着回流时间的增加, Cu/Sn0.3Ag0.7Cu/Cu焊点的抗剪强度呈下降趋势。界面金属间化合物层的厚度影响焊点的抗剪强度, Cu_6Sn_5 相和 Cu_3Sn 相随回流时间增加而增厚, 而钎料基体较软, 对焊接接头施加拉力, 钎料基体与金属间化合物层会在界面处受集中应力的影响, 这为裂纹的形成提供基础, 裂纹沿着界面方向快速成长, 从而导致接头抗剪强度的下降。抗剪强度在回流初期下降速度较快(0~4h); 而在回流后期(4~12h)抗剪强度下降趋势较为平缓, 这是由于界面金属间化合物的生长先快后慢; 回流初期界面中Cu原子快速与Sn原子反应生成 Cu_6Sn_5 , 随着回流时间增长较厚的 Cu_6Sn_5 和较薄的 Cu_3Sn 阻碍了Cu原子由Cu基底向界面扩散, 金属间化合物生长较为缓慢。与回流初期对比, 当回流时间为12h时, 焊点的抗剪强度由34.54MPa降低至20.99MPa, 下降幅度为39.2%。

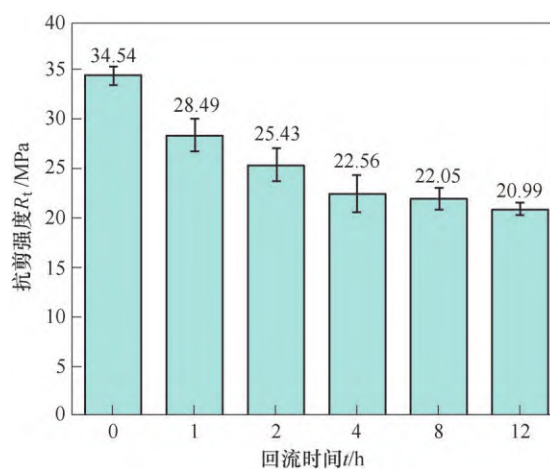


图8 不同回流时间下Sn0.3Ag0.7Cu钎料焊点的抗剪强度

4 结束语

1) 当回流温度为250℃时, 随回流时间的增加, 焊缝界面金属间化合物逐渐增大, 焊点的金属间化合物主要由大量的 Cu_6Sn_5 和少量的 Cu_3Sn 组成,

金属间化合物的组织形貌由锯齿状转变为扇贝状，由于温度梯度的存在，热端金属间化合物的生长速率小于冷端。

2) 计算了冷热两端金属间化合物的扩散系数和生长动力学指数。冷端金属间化合物的扩散系数和生长动力学指数分别为 $0.568\mu\text{m}^2/\text{h}$ 和0.95，热端金属间化合物的扩散系数和生长动力学指数分别为 $0.019\mu\text{m}^2/\text{h}$ 和0.32。冷端金属间化合物的生长处于反应控制阶段，金属间化合物的生长受Cu原子扩散速率影响，热端金属间化合物的生长处于晶界扩散控制阶段，金属间化合物的生长受Cu原子穿越晶界速率的影响，生长极为缓慢。

3) 脆硬相 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 在拉力的作用下为裂纹提供形核基础，降低了焊点的抗剪强度，焊点抗剪强度由时效初期0h时的34.54MPa降至12h时的21.29MPa，降低了39.2%。

参考文献:

- [1] WANG X, ZHANG L, LI M, et al. Enhancement of structure and properties of Sn58Bi solder by AlN ceramic particles[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2584-2595.
- [2] YANG T L, AOKI T, MATSUMOTO K, et al. Full intermetallic joints for chip stacking by using thermal gradient bonding[J]. Acta Materialia, 2016, 113: 90-97.
- [3] WANG Y C, FLESHMAN C J, SUN L, et al. Recent progress in SLID bonding in novel 3D-IC technologies[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818: 152825.
- [4] TU K N, LIU Y. Recent advances on kinetic analysis of solder joint reactions in 3D IC packaging technology[J]. Surface Mount Technology, 2017, 29 (3): 151-155.
- [5] TU K N, LIU Y. Recent advances on kinetic analysis of solder joint reactions in 3D IC packaging technology[J]. Materials Science and Engineering, R. Reports, 2019, 136: 1-12.
- [6] ZHANG L, LIU Z, YANG F, et al. Cu/SnAgCu/Cu TLP with different thicknesses for 3D IC[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2017, 29 (3): 151-155.
- [7] ATTARI V, GHOSH S, DUONG T, et al. On the interfacial phase growth and vacancy evolution during accelerated electromigration in Cu/Sn/Cu microjoints[J]. Acta Materialia, 2018, 160: 185-198.
- [8] GUSAK A M, TU K N, CHEN C. Extremely rapid grain growth in scallop-type Cu_6Sn_5 during solid-liquid interdiffusion reactions in micro-bump solder joints[J]. Scripta Materialia, 2020, 179: 45-48.
- [9] WANG Y C, FLESHMAN C J, SONG R W, et al. Diversifying grain orientation and expediting $10\mu\text{m}$ Cu/Sn/Cu TLP bonding process with Ni doping[J]. Journal of Materials Science, 2021, 32: 2639-2646.
- [10] BAO Y, WU A, SHAO H, et al. Microstructural evolution and mechanical reliability of transient liquid phase sintered joint during thermal aging[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 765-776.
- [11] GUO X J, LI Z L, SONG X G, et al. Influence of Ni particle addition on grain refinement of Cu-Sn intermetallic compound joints bonded at various temperatures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 774: 721-726.
- [12] 周晖淳, 张宁, 储杰, 等. 回流时间对纯铜基板 Sn0.3Ag0.7Cu 钎料钎焊焊点组织和力学性能影响[J]. 焊接, 2023 (11): 20-24, 61.
- [13] 赵宁, 钟毅, 黄明亮, 等. 热迁移对Cu/Sn/Cu焊点液-固界面 Cu_6Sn_5 生长动力学的影响[J]. 物理学报, 2015, 64 (16): 348-357.
- [14] 师磊. Sn0.3Ag0.7Cu无铅钎料界面反应对焊点可靠性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [15] 涂文斌, 胡志华, 邹雨柔, 等. 时效时间和Sb添加对Sn-9Zn-3Bi/Cu焊点界面金属间化合物生长行为的影响[J]. 材料导报, 2025, 39 (6): 193-198.

(收稿日期: 20250209)