

Ni 颗粒对 SAC305 钎料熔化特性及力学性能的影响

周 慧, 闫焉服, 程江洋

(河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 针对低温焊接与高温服役场景下的温度梯度需求, 开发了变温焊料, 并明确了 Ni 颗粒含量对焊料及钎接头性能的调控规律。以 4#SAC305 钎料粉为基体, 复配 2~5 μm Ni 颗粒与 HP01 高活性助焊剂, 制备了 Ni 颗粒可变温锡膏; 研究 Ni 含量(质量分数)对锡膏熔化特性、润湿性的影响, 及时效过程中钎接头界面金属间化合物(IMC)生长与剪切强度变化。结果表明: 当 Ni 含量为 10% 时, 焊料的熔点上升至 227 $^{\circ}\text{C}$, 在高温储存后熔点仅微幅上升。随着 Ni 含量的增加, 润湿性先升高后降低, 在 Ni 含量达到 20% 时, 铺展面积减少了 60%。界面 IMC 层的厚度与时效时间的平方根呈现良好的拟合关系, 在 20%Ni 含量下时效 360 h 后, IMC 层的厚度达到 37.611 μm 。相同 Ni 含量下, 随着时效时间的延长, 剪切强度会降低; 而在相同时效时间下, 随着 Ni 含量的增加, 剪切强度也会减小。10%Ni 含量的焊料剪切强度受时效影响较小, 且断口表现出韧脆混合的特征。10%Ni 含量的变温焊料综合性能最优, 既提高焊料熔点, 又在高温服役中表现出良好稳定性, 可满足温度梯度使用需求。

关键词: 变温焊料; 熔化特性; 润湿性; 热效应; 剪切强度

中图分类号: TG425

文献标识码: A

DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2025.0118

引用格式: 周慧, 闫焉服, 程江洋. Ni 颗粒对 SAC305 钎料熔化特性及力学性能的影响 [J]. 电子元件与材料, 2025, 44(10): 1229-1236.

Reference format: ZHOU Hui, YAN Yanfu, CHENG Jiangyang. Influence of Ni particles on the melting characteristics and mechanical properties of SAC305 solder [J]. Electronic Components and Materials, 2025, 44(10): 1229-1236.

Influence of Ni particles on the melting characteristics and mechanical properties of SAC305 solder

ZHOU Hui, YAN Yanfu, CHENG Jiangyang

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan Province, China)

Abstract: To address the temperature gradient requirements for low-temperature soldering and high-temperature service, variable-temperature solders were developed, and the regulatory effects of Ni particle content on their properties and those of brazed joints were clarified. Using 4#SAC305 solder powder as the base material, 2-5 μm Ni particles and HP01 high-activity flux were compounded to prepare Ni-based variable temperature solder paste. The effects of Ni content on the melting characteristics and wettability of the solder paste, as well as the growth of intermetallic compounds (IMCs) at the brazed joint interface and changes in shear strength during aging, were investigated. The results show that when the Ni content is 10%, the solder's melting point can rise to 227 $^{\circ}\text{C}$, with only a marginal increase observed after high-temperature storage. Wettability initially enhanced and subsequently decreased as the Ni content increased, resulting in a 60% reduction in the spread area observed at 20% Ni. The growth of the interfacial IMC layer corresponds well with the square root of the aging duration, achieving a thickness of 37.611 μm after 360 hours of aging at 20% Ni. Under the same Ni content, shear strength decreases with prolonged aging, and under the same aging condition, it decreases with increasing Ni content. The solder paste with 10%

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51175151)

通信作者: 闫焉服, 教授, 博士, 主要研究方向为先进材料连接。E-mail: yanyanfu@haust.edu.cn

Ni exhibits minimal impact on shear strength due to aging, and its fracture surface displays a mixed ductile – brittle characteristic. The variable-temperature solder with 10% Ni content demonstrates the best overall performance, effectively raises the solder's melting point while exhibiting excellent stability during high-temperature service, thereby meeting the requirements for temperature gradient applications.

Keywords: variable-temperature solder; melting characteristics; wettability; thermal effect; shear strength

随着电子贴装技术的快速发展, 晶圆级芯片尺寸封装(WL-CSP)通常需要经历多次回流^[1-3], 然而现有的温度梯度焊料已经无法满足高端封装技术的发展需求, 温度梯度钎料制备已经成为先进电子封装的研究热点^[4-5]。

闫焉课题组^[6-7]对 Cu/Ag/Ni 颗粒增强的锡基复合钎料展开了深入研究, 研究结果显示这些颗粒显著地提升了锡基复合钎料的抗蠕变性能和力学性能; 其中质量分数为 1%Cu 颗粒增强 SnPb 基复合钎料的蠕变寿命较基体钎料提高了 17 倍; 质量分数为 5%Ag 颗粒增强 SnCu 基复合钎料的蠕变寿命较基体钎料提高了 23 倍; 质量分数为 5%和 10%的 Ni 颗粒增强锡铅基复合钎料的蠕变寿命分别较基体钎料提高了 85 倍和 168 倍。Ni 颗粒增强型 SnBi 无铅钎料的制备和性能研究显示, Ni 颗粒可能对熔化特性有重要影响。高源^[8]通过向 Sn-0.3Ag-0.7Cu 钎料合金中添加微量纳米 Ni 颗粒, 研究结果表明微量的 Ni 对钎料熔点的影响并不显著。顾鑫^[9]通过混合搅拌的方式制备了 SAC305/(0.01%~0.5%)Ag 复合锡膏, 采用 DSC 测试分析纳米 Ag 颗粒对焊料合金热特性的影响。发现随着纳米 Ag 颗粒添加量的增加, 焊料合金的熔点呈现出先升高后降低的趋势, 其中最大升温幅度达到了 2.2 °C。石成杰^[10]在 SAC305 中加入质量分数为 10%的 Cu 颗粒, 使焊料熔点提升了 13 °C。Mokhtari 等^[11]通过机械混合法, 在 Sn-Bi 焊料中添加了质量分数为 30%的 Cu 颗粒, 使得焊缝熔点从 139 °C 提升至 201 °C。综上所述, 颗粒增强复合钎料不仅能够提升抗蠕变性能和力学性能, 同时还会对复合钎料的熔化特性产生一定影响。然而, 从现有文献来看目前针对高含量 Ni 颗粒对 SAC305 钎料熔化特性影响的研究相对较少。

本文以 SAC305 无铅钎料作为研究对象, 深入研究了 Ni 对 SAC305 无铅复合钎料熔化特性的影响、焊接接头在时效过程中的组织演变规律, 以及在时效条件下不同 Ni 含量对复合焊料剪切强度的影响, 通过开展相关分析探究其影响机理, 为丰富多温度梯度软钎料体系及多级封装技术的发展提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 复合焊膏制备

基体钎料选用北京康普锡威科技生产的 4#SAC305 粉末, 增强颗粒为 2~5 μm Ni 颗粒, 由广州金属冶金(集团)提供。将 4#SAC305 粉末与 Ni 颗粒按多种比例精确混合, 制备复合焊粉基底。随后, 将此复合焊粉与 HP01 高活性助焊剂按严格的质量配比 88:12 均匀混合, 最终生成颗粒强化的复合焊膏。Ni 颗粒在复合焊粉中的质量分数分别为 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20%, 机械混合时间不少于 30 min。然后将混合物装入锡膏专用密封罐, 再放入锡膏搅拌机中搅拌 3 min, 以保证金属颗粒在复合焊膏中均匀分布。取出后冷藏保存备用, 制备流程如图 1 所示。



图 1 可变温锡膏制备基本流程

Fig.1 Basic process for preparing temperature-adjustable solder paste

1.2 熔化特性测试

选取一块尺寸为 40 mm×40 mm×1 mm(长×宽×高)的铝基板, 在其表面精确涂布 0.3 g 复合焊膏, 随后使用 962D 八段回流焊机进行回流实验, 得到无铅复合焊点。实验峰值温度设定为 250 °C, 钎焊时长为 120 s。使用 DSC300 型差示扫描量热仪开展熔点测试, 准确称取 10 mg 样品, 设置测量温度范围为 0~300 °C, 并选择 10 °C/min 的升温速率。测试过程中, 样品在纯氮气的保护氛围中进行, 以防止氧化影响。

1.3 润湿性能测定

利用精密电子天平精确地称取 0.3 g 颗粒增强复

合焊膏,再放置于尺寸为 30 mm×30 mm×0.3 mm 的紫铜板上。随后,采用 962D 回流焊机进行实验,实验设定钎焊温度为 250 ℃,钎焊时长设定为 2 min。采用已知面积的标准参照物(一元硬币)作为参照,并将铺展试样和参照物拍摄对照,然后用 Photoshop 软件测定铺展试样面积 S ,计算公式如式(1)所示:

$$S = \left(\frac{S_2}{S_0} \right) \times S_1 \quad (1)$$

式中: S 为焊点实际铺展面积(mm^2); S_2 为焊点铺展面积的测量值(mm^2); S_0 为标准参照物面积的测量值(mm^2); S_1 为标准参照物的实际面积(mm^2)。

沿润湿试样中心进行裁剪,使用 Photoshop 软件测量横截面(图 2)中的润湿角 θ_l 和 θ_r 。由公式(2)可求出润湿角 θ :

$$\theta = (\theta_l + \theta_r) / 2 \quad (2)$$

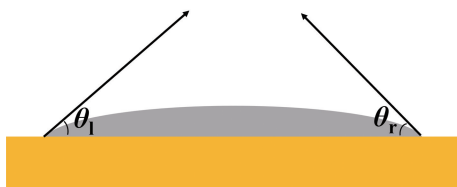


图 2 铺展试样的横截面示意图

Fig. 2 Schematic cross-section of the spreading specimen

1.4 力学性能测定

在尺寸为 60 mm×25 mm×2 mm 的紫铜板上开展搭接实验,确保每组的钎料添加量及常温下在铜板上的涂抹面积保持一致,搭接区域尺寸统一设定为 25 mm×10 mm。采用回流焊接炉进行实验,设定焊接温度为 250 ℃。焊接实验结束后,将试样置于真空干燥箱中进行时效处理,设定温度为 150 ℃,按照 0, 120, 240, 360 h 的时间节点依次取出时效样件。力学性能测试在 WDW-100 型微机控制电子万能试验机上进行,剪切速度设定为 1 mm/min,实验温度为 25 ℃,为确保数值准确性,接头拉剪强度测试值取 3 个试样的平均值。再利用线切割机器将复合焊料/Cu 基板试样切割出横截面,并对横截面进行打磨、抛光处理。随后,采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对横截面的组织形貌与成分展开观察分析。

2 结果分析与讨论

2.1 Ni 颗粒含量对无铅复合焊点熔点影响

图 3 为试样 DSC 曲线示意图。根据 ICTA 标准化委员会相关规定,DSC 曲线的前基线延长线与峰的前沿最大斜率处切线的交点代表熔点,前基线是指在熔化过程之前接近水平的基线。图 3 中 A 点对应的点 T_A 是外推起始点温度(固相线温度),也即熔点,该点由峰前沿最大斜率处的切线与前基线延长线的交点确定,B 点对应的点 T_B 是液相线温度,C 点对应的温度是峰值。熔程即为液相线温度与固相线温度之差。

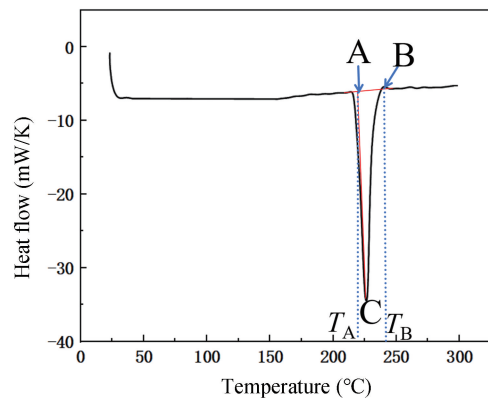


图 3 DSC 曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DSC curve

2.1.1 回流后 Ni 颗粒含量对变温焊料熔点影响

表 1 和图 4 为回流后 Ni 颗粒含量对变温焊料熔化特性的影响。可以看出:在 Ni 质量分数从 0% 增加至 10% 的过程中,变温焊料的熔点、峰值、液相线均随 Ni 质量分数增加而呈现出升高的趋势;当 Ni 元素的质量分数达到 10% 时,焊料的熔点达到最高值 227 ℃,相较于基体钎料熔点提高了 10 ℃。在 Ni 质量分数为 15% 和 20% 时,变温焊料的熔点相较于 10% 时略有下降,但熔点仍保持在较高水平且高于基体钎料。随着 Ni 含量的增加,熔程虽表现出一定波动,但总体保持相对稳定,且高于基体钎料。这是由于在基体钎料中加入 Ni 颗粒在回流后组成成分除了 β -Sn 和 Ag_3Sn 以外,还有 $(\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{Sn}_4$ 、 $(\text{Ni}, \text{Cu})_6\text{Sn}_5$ 相,多种合金在熔化时,由于熔化温度不同,从而使熔程变大,对焊接性能会产生不利影响。

图 5 为 Ni 颗粒变温焊料回流后的扫描电镜(SEM)图。从图中可以看出,Ni 颗粒与基体焊料已发生冶金反应,并两者紧密结合在一起,其中黑色部分表示

表 1 回流后 Ni 含量对变温焊料熔化特性的影响

Tab.1 Effect of Ni content after reflow on the melting characteristics of temperature-variable solder

成分	固相线(℃)	峰值(℃)	液相线(℃)	熔程(℃)
SAC305	217.6	222.5	228.4	10.8
SAC305+1%Ni	219.7	234.6	243.3	23.6
SAC305+3%Ni	221	236	244.2	23.2
SAC305+5%Ni	223.1	236.4	245.6	22.5
SAC305+10%Ni	227	240.6	248.9	21.9
SAC305+15%Ni	226.1	238.3	247	20.9
SAC305+20%Ni	224.3	238.1	246.6	22.3

难溶且未与基体焊料反应的 Ni 颗粒。除紧邻 Ni 颗粒的灰色金属间化合物(IMC)外,变温焊料内部还散布着不含 Ni 颗粒内核的 IMC。通过 EDS 检测,此灰色部分 IMC 为 Sn-Ni-Cu 的三元合金或者固溶体,银白色相为 Ag_3Sn 。对于 1% Ni 颗粒添加的变温焊料而言(如图 5(a)),灰色 IMC 呈散点状, SAC305 作为近共晶焊料,成分均匀,熔点与基体焊料相近。但是对于 10% Ni 颗粒添加的变温焊料而言(如图 5(b)),此时部分 Ni 颗粒团聚,其周围的灰色 IMC 交织并逐渐连成一片,随着 Ni 含量增加,团聚现象加剧,IMC 生成量也随之增多。由于微米 Ni 颗粒具有较大的比表面

积,因此会消耗更多的 Sn,进而导致 SAC305 合金中 β -Sn 相的含量显著降低。相组成发生变化,也偏离了共晶成分。由于 SAC305 焊料本身属于近共晶类型,因此复合锡膏的熔点会相应升高。对于添加了 20% Ni 颗粒的变温焊料,其熔点稍有下降。其原因在于无铅复合焊料的熔点不仅与相组成的变化有关,还受到相组成热特性的影响。Ni 颗粒与 β -Sn 相的吸热效应对焊料熔点的降低作用明显超过了 Ni 颗粒周围 IMC 增多所导致的熔点升高影响,因此熔点降低。

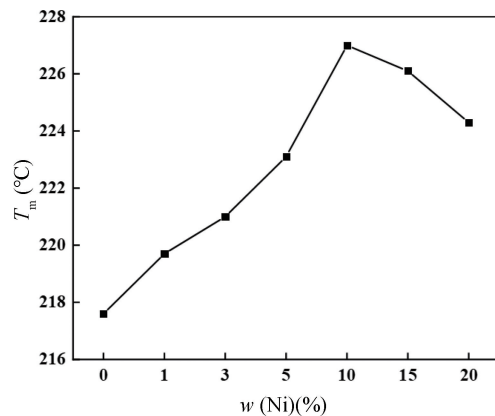
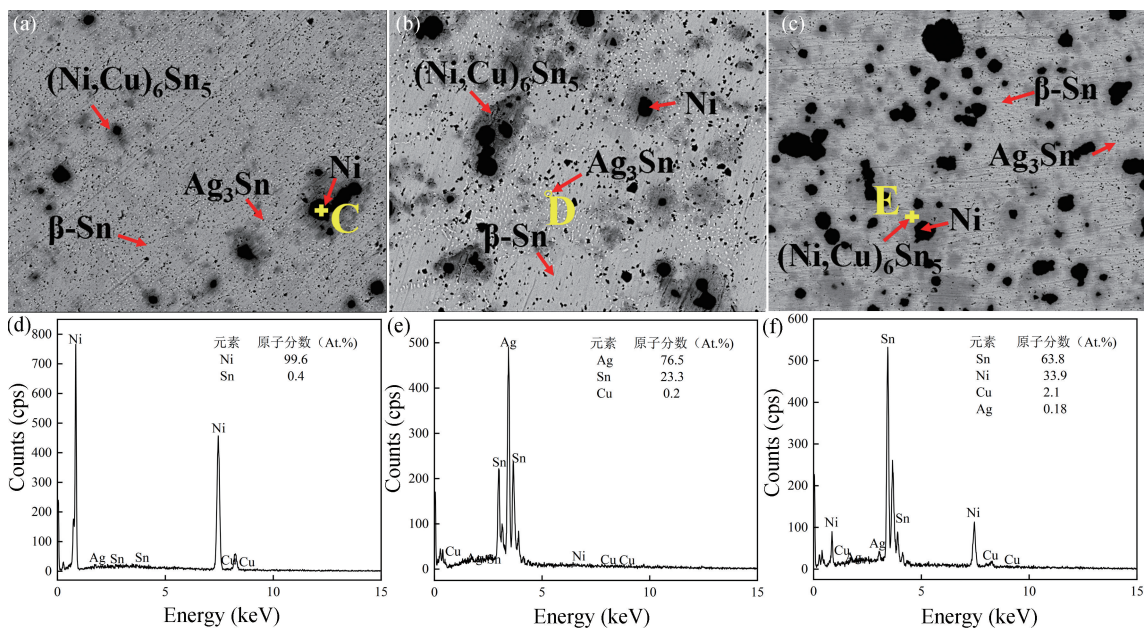


图 4 Ni 含量对变温焊料熔点的影响

Fig.4 Influence of Ni content on the melting point of temperature-variable solder



(a) 1%Ni; (b) 10%Ni; (c) 20%Ni; (d) C 点能谱; (e) D 点能谱; (f) E 点能谱

图 5 回流后变温焊料 SEM 和 EDS 图

Fig.5 SEM and EDS images of temperature-variable solder after reflow

2.1.2 高温储存后 Ni 颗粒含量对变温焊料熔点影响

表 2 为高温储存后 Ni 颗粒含量对变温焊料熔化特性的影响。高温储存对变温焊料的熔点影响并不显著, 总体上熔点随 Ni 含量的增加呈现先升后降的趋势。当 Ni 质量分数为 10% 时, 熔点达到最高值 226.8 °C, 相较于基体焊料高出 8.2 °C。此时液相线略有降低, 熔程也略有减小。随着 Ni 含量的增加, 熔程呈现先下降后略微上升的趋势, 且变化幅度较小。由于熔化范围的缩小有助于变温焊料的实际应用, 可有效减轻焊接过程中对基板的侵蚀和偏析现象。固相和液相线温度的变化可归因于加入金属元素后, 合金成分更接近或远离共晶成分的特性^[14]。

在图 6 中, 添加 10% Ni 的变温焊料经高温储存后, Ni 颗粒周围的 IMC 厚度并未明显增厚, 仅观察到 Ni 颗粒更为明显地团聚现象。变温焊料的熔化特性变化规律以及焊料内部的微观组织在回流和高温储存后均未发生显著改变, 这表明变温机理保持一致。

表 2 高温储存后 Ni 含量对变温焊料熔化特性的影响

Tab. 2 Influence of Ni content on the melting characteristics of temperature-variable solders after high-temperature storage

成分	固相线(°C)	峰值(°C)	液相线(°C)	熔程(°C)
SAC305	218.6	223.5	228.9	10.3
SAC305+1%Ni	219.7	233.6	240.3	20.6
SAC305+3%Ni	221.2	236.8	240.5	19.3
SAC305+5%Ni	224.3	236.8	242.7	18.4
SAC305+10%Ni	226.8	239.6	245.1	18.3
SAC305+15%Ni	226.1	238.7	246.2	20.1
SAC305+20%Ni	224.2	238.1	245.7	21.5

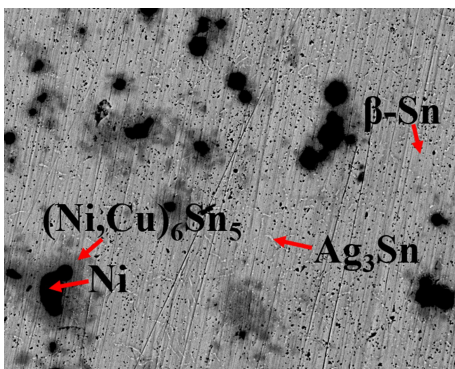


图 6 高温储存后 10%Ni 变温焊料 SEM 图

Fig. 6 Scanning electron microscope image of 10% Ni temperature-variable solder after high-temperature storage

2.2 润湿性分析

图 7 为 Ni 颗粒添加变温焊料及 SAC305 基体焊料回流后铺展面积和润湿角的变化情况。可以看出, 当 Ni 质量分数小于 5% 时, 变温焊料均表现出较好的润湿性。当 Ni 质量分数小于 1% 时, 变温焊料润湿面积增加, 润湿角减小; Ni 质量分数在 1%~3% 之间, 润湿面积略有降低, 但仍高于基体焊料; 在 Ni 质量分数超过 3% 后, 随着 Ni 含量的继续增加, 变温焊料的润湿面积先增后减; 当 Ni 质量分数达到 5% 以上时, 润湿面积显著下降。由此可见少量 Ni 颗粒的添加能降低液态变温焊料的界面张力, 从而略微增加润湿面积。然而, Ni 金属颗粒在焊接过程中活性较高, 易生成氧化物, 进而阻碍焊料的润湿。且 Ni 添加量越多, 生成的氧化物也越多, 进而阻碍作用愈发明显。当 Ni 质量分数超过 3% 时, 这种阻碍作用对变温焊料的影响将逐渐超越 Ni 颗粒添加所减少的界面张力对变温焊料产生的影响。Ni 含量越高, 变温焊料的黏度越大, 从而对润湿面积产生影响。且由图 4 可知, 添加 Ni 的变温焊料熔点均高于基体钎料, 这意味着在相同的钎焊工艺条件下, 添加 Ni 的变温焊料的过热度相较于基体钎料会有所降低, 从而导致添加 Ni 颗粒的变温焊料的润湿性均差于基体钎料。当 Ni 质量分数为 20% 时, 焊料的铺展面积相较于未添加 Ni 时下降了 60%。

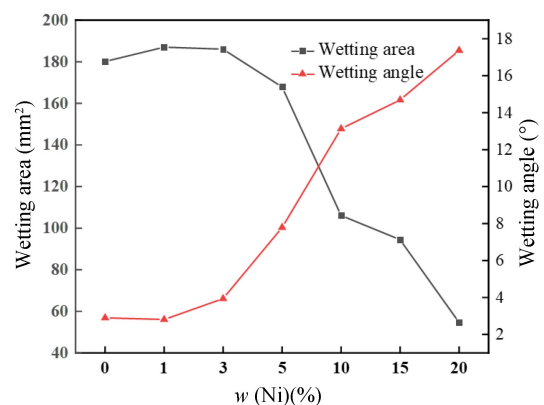


图 7 Ni 含量对变温焊料的润湿面积和润湿角的影响

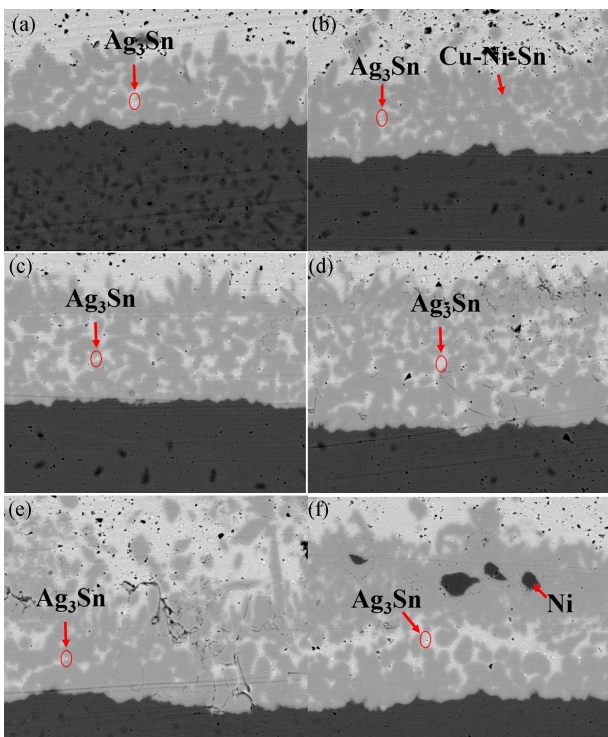
Fig. 7 The influence of Ni content on the wetting area and wetting angle of temperature-variable solder

综上所述, 变温焊料的润湿性能受多种因素影响, 包括其黏度、母材间的界面张力以及过热度。随着锡膏黏度的增大, 焊点的铺展将受到阻碍; 而降低界面张力则有助于扩大润湿面积。此外, 通过提高过热度, 还可以进一步改善锡膏的润湿性能。在实际生产过程中, 需综合考量这些因素所产生的影响。

2.3 微观组织分析

2.3.1 未时效 Ni 颗粒可变温焊料/Cu 焊接接头微观组织演变

图 8 为回流后时效前不同 Ni 含量添加变温焊料焊接接头微观组织图。Ni 质量分数分别为 1%、3%、5%、10%、15%、20%。此时，IMC 层并未呈扇贝状形态^[15]，其表面呈微锯齿状，内部则呈孔洞状。随着 Ni 含量的递增，IMC 层逐渐变厚且变得更为疏松。当 Ni 质量分数为 20% 时，Ni 颗粒在焊料层发生了团聚，如图 8(f) 所示。



(a) 1% Ni; (b) 3% Ni; (c) 5% Ni; (d) 10% Ni; (e) 15% Ni; (f) 20% Ni

图 8 未时效不同 Ni 含量添加变温焊料焊接接头 SEM 图
Fig. 8 SEM images of welding joints with variable-temperature solders containing different Ni contents before aging

此外，IMC 层内还嵌入了大量细小颗粒状的 Ag_3Sn 化合物。这是由于具有孔洞状的 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 化合物为界面附近的各种元素提供了扩散的通道，基板上 Cu 可以通过这些通道扩散到钎料中生成 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 层，进而使得 Ag 浓度相对增加与 Sn 形成 Ag_3Sn 化合，此时 Sn 元素通过孔洞状的 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 扩散到 Cu 基板上形成薄薄一层 Cu_3Sn 。根据文献^[16]，Ni-Sn 的亲合力大于 Cu-Sn 的亲合力，因此 Ni 可以取代 Cu_6Sn_5 中 Cu 的位置形成 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ ，此类 IMC 因吉布斯自由

能降低而保持稳定。因此添加 Ni 颗粒的变温焊料在 Cu 基板上能够形成 Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn 及 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 化合物。

2.3.2 时效后 Ni 颗粒可变温焊料/Cu 焊接接头微观组织演变

图 9 展示了在 150 °C 下，不同时效时间与不同 Ni 含量添加的变温焊料焊接接头的微观组织图，其中 Ni 质量分数分别为 1%、5%、10% 和 20%。3%Ni 与 5%Ni 以及 15%Ni 与 10%Ni 的变温焊料在微观界面层形貌上分别呈现出相似性。从图 9 可以看出，焊料层中添加 Ni 颗粒的变温焊料呈现出不同程度的团聚现象。且同一时效下，随着 Ni 含量的增加，IMC 层逐渐增厚。时效过程中，具有高表面能及强活性的未溶解 Ni 颗粒倾向于吸附在界面处的 IMC 晶粒表面，从而降低其表面自由能。另外 Cu 基板上 Cu 和变温焊料中的 Sn、Ni 同时向 IMC 中扩散，由于 Ni 在 Sn 中的扩散系数远大于 Cu 在 Sn 的扩散系数，因此在界面 Cu_6Sn_5 的外表面，形成了 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 这一界面化合物层，这在一定程度上也促进了 IMC 在时效中的增厚。

当在 150 °C 下时效 120 h 后，所有添加了 Ni 颗粒的变温焊料界面均未观察到裂纹现象。当时效时间延长至 240 h 时，仅 1%Ni 焊料的 IMC 层未出现裂纹，而其他添加了不同 Ni 含量的变温焊料在 IMC 层均出现了不同程度的裂纹；特别是 20%Ni 变温焊料，其 IMC 层甚至发生了断裂。当时效时间达到 360 h 时，含 20%Ni 的变温焊料在 Cu 基板与 IMC 的界面处出现完全断裂。

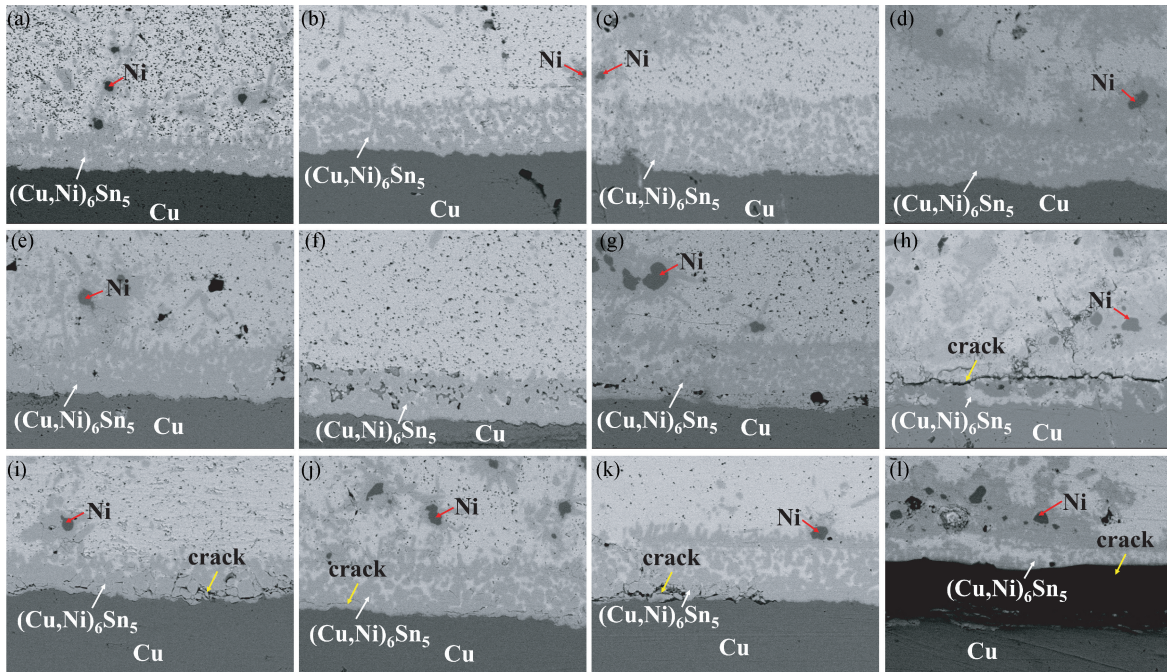
2.3.3 Ni 颗粒可变温焊料/Cu 界面 IMC 形成机制

对所有添加 Ni 颗粒的变温焊料样品在不同时效时间下的界面总 IMC 层厚度进行统计，结果如表 3 所示。表 3 数据显示，在同一时效时间下，随着 Ni 颗粒含量增加，变温焊料的 IMC 厚度呈增厚趋势；同时，对于同一种变温焊料，IMC 厚度也随时效时间延长而增厚。最终含 20%Ni 颗粒的变温焊料在经历 360 h 时效处理后，IMC 厚度增至 37.611 μm。随后，以时效时间的平方根作为横坐标，界面 IMC 厚度作为纵坐标，绘制了 IMC 厚度与时效时间平方根的关系图，二者呈现出良好的线性关系，如图 10 所示。拟合直线的斜率为 IMC 生长速率，可以看出 Ni 添加的变温焊料的斜率均为正，因此说明，同一水平的 Ni 含量添加变温焊料随着时效时间的延长，IMC 厚度是逐渐增加的趋势。同时从斜率上来看，20%Ni 颗粒变温焊料的生长速率相对来说是最快的，总的来说不同 Ni 含量变温焊料界面 IMC 的生长速率相差并不大。研究显示，在基体焊料 SAC305 中添加大于 1% 的 Ni 颗粒，可能会

促进界面金属化合物(IMC)的生长,而非抑制其增长。
2.4 恒温时效下 Ni 颗粒可变温焊料焊接接头的剪切强度

图 11 为 Ni 颗粒添加变温焊料的剪切强度与时效时间的变化曲线。从图中可以看出,同一 Ni 含量的变温焊料,随着时效时间的延长,剪切强度呈下降趋势。当时效时间从 0 h 增加到 480 h 时,10%Ni 变温焊料的

剪切强度仅从 42.6 MPa 下降至 36.5 MPa,下降幅度为 6.1 MPa,这显示出剪切强度受时效时间的影响相对较小。且同一时效时间下,变温焊料的剪切强度随着 Ni 含量的增加而降低。时效 480 h 后,15%Ni 变温焊料的剪切强度下降至 24.6 MPa,而 20%Ni 变温焊料则降至 20 MPa,此强度下降是焊料层与 IMC 层、IMC 层与基板之间发生界面断裂所致。



(a) 1% Ni 时效 120 h; (b) 5% Ni 时效 120 h; (c) 10% Ni 时效 120 h; (d) 20% Ni 时效 120 h; (e) 1% Ni 时效 240 h; (f) 5% Ni 时效 240 h; (g) 10% Ni 时效 240 h; (h) 20% Ni 时效 240 h; (i) 1% Ni 时效 360 h; (j) 5% Ni 时效 360 h; (k) 10% Ni 时效 360 h; (l) 20% Ni 时效 360 h

图 9 时效下不同 Ni 含量添加变温焊料焊接接头 SEM 图

Fig. 9 SEM images of welding joints with different Ni contents added to the thermally aged variable-temperature solder

表 3 变温焊料界面层总 IMC 厚度与时效时间的关系

Tab. 3 Relationship between total IMC thickness in the interface layer of thermally cycled solder and aging time

成分	总 IMC 厚度(μm)			
	0 h	120 h	240 h	360 h
SAC305	3.559	3.516	3.036	3.469
SAC305+1%Ni	10.716	12.944	16.524	21.738
SAC305+3%Ni	12.631	18.540	21.032	23.127
SAC305+5%Ni	17.663	22.992	26.667	29.452
SAC305+10%Ni	22.274	29.921	31.190	29.706
SAC305+15%Ni	24.632	30.071	31.294	32.960
SAC305+20%Ni	25.600	33.365	36.753	37.611

3 结论

本文制备了 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xNi 焊膏,研究了 Ni 含量对复合焊膏熔化特性、润湿性及焊点时效下 IMC 层剪切强度及焊点剪切断面形貌的影响,得到如下主要结论:

(1) Ni 颗粒含量对 SAC305 复合焊膏的熔化特性有一定影响,其变化会进一步影响焊接过热度,进而间接调控铺展性能。添加质量分数为 10% 的 Ni 颗粒可使焊料熔点升高至 227 ℃,较基体焊料高出 10 ℃;高温储存后,熔点变化幅度较小,这为开发温度梯度焊料提供了新的思路。

(2) Ni 颗粒含量会显著影响复合焊膏铺展性能。

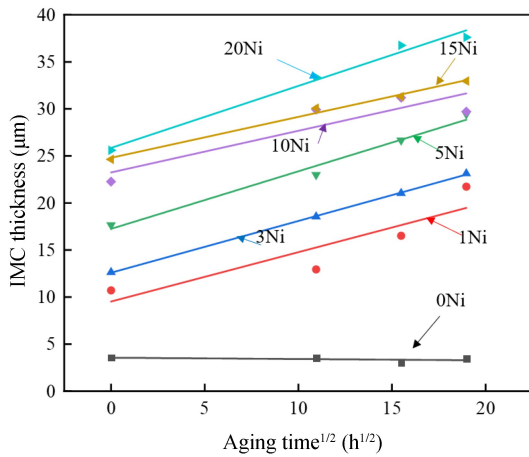


图 10 界面 IMC 厚度与时效时间平方根的关系
Fig. 10 Relationship between IMC thickness and square root of aging time in interface

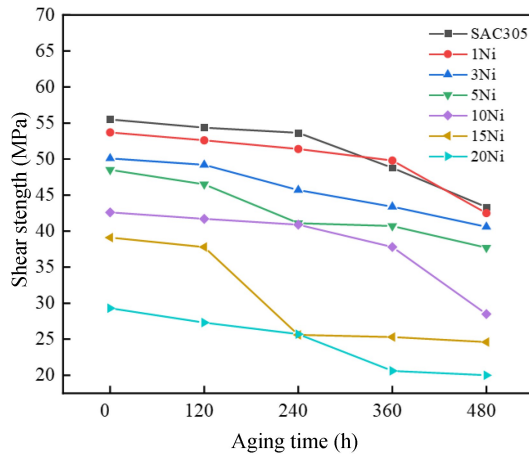


图 11 不同 Ni 颗粒含量对复合焊料拉剪强度的影响
Fig. 11 Effect of different Ni particle contents on the tensile-shear strength of composite solders

并且适量添加可改善润湿行为。在添加质量分数为 10% 的 Ni 颗粒后, 变温焊料的润湿性可以满足实际生产要求, 能够形成可靠的焊接接头。变温焊料的润湿性能受黏度、界面张力及过热度等多因素共同影响, 在实际应用中需综合优化以确保焊接质量。

(3) Ni 颗粒含量会显著影响复合焊膏力学性能。界面 IMC 层的厚度与时效时间的平方根呈良好的线性关系。当 Ni 质量分数达到 10% 时, IMC 的厚度处于适中水平, 此时变温焊料的剪切强度受时效时间的影响

较小, 这对于优化温度梯度钎料的服役能力以及提升焊接接头的力学性能而言, 具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 马浩然. Sn 基焊点多次回流界面反应机理及动力学研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [2] 常青松, 徐达, 袁彪, 等. 多次回流焊后金属间化合物及焊点强度分析 [J]. 电子与封装, 2023, 23(8): 41-44.
- [3] Zaimi N S M, Salleh M A A M, Abdullah M M A B, et al. Effect of kaolin geopolymer ceramics addition on the microstructure and shear strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joints during multiple reflow [J]. Materials, 2022, 15(8): 2758.
- [4] 王佳星. 变温焊料性能及可靠性研究 [D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2023.
- [5] Wang J, Lin P, Yao Q, et al. Transient liquid phase bonding of Sn-Pb solder with added Cu particles [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2671(1): 012022.
- [6] 闫焉服, 刘建萍, 史耀武, 等. 铜颗粒增强对锡铅钎料蠕变寿命的影响 [J]. 电子工艺技术, 2004(1): 20-22.
- [7] 闫焉服, 陈拂晓, 张鑫, 等. 温度对 Ag 颗粒增强 SnCu 基复合钎料蠕变性能的影响 [J]. 稀有金属, 2006(5): 610-614.
- [8] 高源. 镍纳米颗粒对低银钎料的性能影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [9] 顾鑫. 纳米 Ag 颗粒对 Sn3.0Ag0.5Cu 焊料熔化特性, 可焊性及可靠性影响 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [10] 石成杰. 微米银/铜颗粒增强锡基钎料的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [11] Mokhtari O, Nishikawa H. Transient liquid phase bonding of Sn-Bi solder with added Cu particles [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27: 4232-4244.
- [12] 郭青蔚, 王桂生, 郭庚辰. 常用有色金属二元合金相图集: 有色金属二元合金相图集 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [13] Petrova I, Gandova V. Experimental investigation and thermochemical calculations in Ni-Sn and Ni-Sn-Zn systems [J]. AIP Conference Proceedings, 2024, 2980(1): 060010.
- [14] Zhao W, Yang Y, Zhang E, et al. Thermodynamic descriptions of the binary Ni-Sn and ternary Cu-Ni-Sn systems over entire composition range: A revisit [J]. Calphad, 2021, 75: 102344.
- [15] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册: 第 2 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [16] 廖跃辉. Ni, Sn 含量变化对 Cu-Ni-Sn 合金时效过程的影响 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.