

Sn-Cu-Co-Ni-Bi 高温软钎料组织及性能研究

樊江磊 王娇娇 王宁格 吴 深 周向葵 李 莹 王 艳
(郑州轻工业大学机电工程学院)

摘 要 根据高熵合金设计原理设计了多组元 Sn 基高温无铅软钎料,研究了 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的微观组织、力学性能和钎焊性能随合金混合熵改变的变化规律。结果表明,钎料合金的微观组织由固溶体和析出相 Sn、Bi、CoSn₂、Cu₆Sn₅ 和 Ni₃Sn₄ 组成,随着混合熵值的增大,钎料合金组织中的固溶体含量逐渐增大,Sn 基体含量逐渐降低,且硬度逐渐增大,维氏硬度(HV_{0.5})最高为 410,布氏硬度(HB)最高为 158。抗拉强度先增大后减小,且在中熵成分时最大,耐腐蚀性能呈增强趋势。钎料合金熔点为 138~269 ℃,电阻率为 0.182~1.25 μΩ·m。随着混合熵值的增大,电阻率虽呈增大趋势,但仍与 Sn-90Pb 钎料电阻率接近。

关键词 无铅钎料;高熵合金;微观组织;力学性能;钎焊性能

中图分类号 TG425 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Sn-Cu-Co-Ni-Bi High-temperature Solder

Fan Jianglei, Wang Jiaojiao, Wang Ningge, Wu Shen, Zhou Xiangkui, Li Ying, Wang Yan
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry)

Abstract: Multi-component Sn-based high-temperature lead-free solder was designed according to the principle of high-entropy alloy. The variation law of microstructure, mechanical properties and soldering performance of Sn-Cu-Co-Ni-Bi series solder alloys with the mixing entropy of alloy were investigated. The results indicate that the microstructure is composed of solid solution and precipitation phases of Sn, Bi, CoSn₂, Cu₆Sn₅ and Ni₃Sn₄. With the increase of mixing entropy value, the content of solid solution in the solder alloy is gradually increased, the content of Sn matrix is gradually decreased, and the hardness value is gradually increased, where Vickers hardness reaches up to 410 HV_{0.5}, and Brinell hardness reaches up to 158 HB. The tensile strength of the solder is firstly increased and then decreased, which reaches the maximum at the medium entropy composition, and the corrosion resistance presents a trend of gradual enhancement. The melting points of solder alloys are 138 ℃ to 269 ℃, and the resistivity is in ranges of 0.182 μΩ·m to 1.25 μΩ·m. With the increase of mixing entropy, the resistivity is increased gradually, which is still close to that of Sn-90Pb solder.

Key Words: Lead-free Solder, High Entropy Alloy, Microstructure, Mechanical Properties, Solderability

随着微电子工业的发展,电子元器件服役环境越来越复杂,对相关材料的性能要求日益苛刻^[1-2],尤其是对高温条件下的服役稳定性提出了更高要求^[3-4]。软钎料根据熔点可分为低温软钎料(<180 ℃)、中温软钎料(180~260 ℃)、高温软钎料(260~400 ℃)。传统的含铅高温软钎料,如 Pb-5Sn、Pb-10Sn 及 Pb-2Sn-2.5Ag 能够在高温条件下稳定服役^[5],是 IT 设备及网络基础设施、大功率电源及开关、汽车电子、航空航天等军工及民用领域关键电子设备的集成电路封装中极为重要的连接材料^[6-7]。虽然传统的高温软钎料和 Sn-37Pb 中温软钎料都具有钎焊性能优异和成本低等特点,且被广泛

应用在很多电子产品中^[8-10],但是其 Pb 含量较高,不符合日益增强的环保要求^[11]。高温无铅钎料的研究和推广显得尤为重要。目前,已研发出多种无铅钎料,主要是 Sn 基合金,如 Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Zn、Sn-Bi、Sn-Sb、Sn-Cu-Ni、Sn-Cu-Co 等^[12-14]。Sn-Ag 系钎料具有良好的力学性能,但钎焊界面存在应力集中等缺点;Sn-Zn 系钎料合金形成的接头抗剪切强度高,室温下抗疲劳性能好,但具有润湿性较差、加工性差、易氧化等问题^[15-16]。针对这些问题,可通过与不同金属元素合金化的方法来改善。

高熵合金因具有高熵效应、晶格畸变效应、缓慢扩

收稿日期:2022-12-10;修改稿收到日期:2023-01-10

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(222300420584)

第一作者简介:樊江磊,男,1983 年出生,副教授,郑州(450002),E-mail:JLFan2011@163.com

引用格式:樊江磊,王娇娇,王宁格,等. Sn-Cu-Co-Ni-Bi 高温软钎料组织及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 591-1 597.

FAN J L, WANG J J, WANG N G, et al. Microstructure and properties of Sn-Cu-Co-Ni-Bi high-temperature solder[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 591-1 597.

散效应和“鸡尾酒”效应 4 大特点,具有较多传统合金无可比拟的优异性能,因此受到了广泛关注^[17]。因此,利用高熵原理制备的高温软钎料合金有望满足高性能、低成本和无铅化要求^[18-21]。本研究以多元 Sn 基合金为基础,利用高熵合金设计基本原理,通过对合金成分的设计与优化,旨在开发成本低、性能优异且在高温环境下稳定服役的多元 Sn 基高温无铅软钎料。

1 试验方法

1.1 钎料合金的制备

制备的 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金成分见表 1。原材料采用质量分数均为 99.99% 的 Sn、Cu、Co、Ni 和 Bi 块体。采用 HISM1.5kg/Ti 真空感应熔炼炉熔炼钎料合金,加热功率依次是 20、40 和 50 kW,在每个梯度温度下分别保温 5 min,最终熔炼温度约为 1 200 ℃。

表 1 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the alloys		%				
编号	合金	x_B				
		Sn	Cu	Co	Ni	Bi
A ₁	Sn ₈₀ Cu ₅ Co ₅ Ni ₅ Bi ₅	80	5	5	5	5
A ₂	Sn ₆₀ Cu ₁₀ Co ₁₀ Ni ₁₀ Bi ₁₀	60	10	10	10	10
A ₃	Sn ₄₀ Cu ₁₅ Co ₁₅ Ni ₁₅ Bi ₁₅	40	15	15	15	15
A ₄	Sn ₂₀ Cu ₂₀ Co ₂₀ Ni ₂₀ Bi ₂₀	20	20	20	20	20

1.2 试验方案

采用 X'Pert Powder 型 X 射线衍射仪(XRD)分析钎料合金的物相和晶体结构,试验数据采用 MDI Jade6.5 软件进行分析,用 Origin 软件对结果进行处理。采用 Phenom XL 扫描电镜观察钎料合金的显微组织。

采用 DSC214Polyma 型差示扫描量热仪对钎料合金的熔化特性进行测量。从 25 ℃开始升温,升温速率为 10 ℃/min,当温度达到 310 ℃后,保温 5 min,最后以恒速率冷却至 25 ℃,整个试验过程在体积分数为 99.99% 的高纯 N₂ 保护下进行。采用 CHSP-100 盐雾腐蚀试验箱测试钎料合金的耐腐蚀性能,腐蚀介质是质量分数为 5 % 的 NaCl 溶液。采用 TH2512B 型直流低

电阻测试仪测试钎料合金的电阻率。

采用 HV-1000A 显微硬度计测量钎料合金的硬度,载荷为 0.49 N,时间为 10 s。采用 320HBS-3000 布氏硬度计测量钎料合金的布氏硬度,压头直径为 5 mm,载荷为 500 N,加载时间为 10 s,硬度结果取不少于 10 次测试结果的平均值。采用 DNS-100 型万能试验机测量钎料的拉伸性能,拉伸试样见图 1,拉伸速率为 0.5 mm/min。

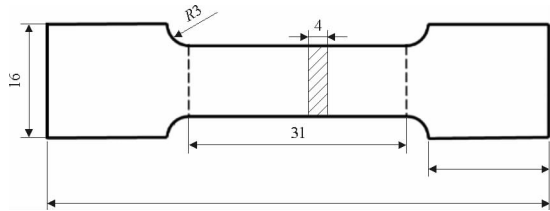


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 钎料合金的 XRD 分析结果

根据多主元高熵钎料合金理论可知,当固溶体有 n 种元素,且摩尔分数为 c_i ,则合金的混合熵 S_{mix} 计算公式为^[22-23]:

$$S_{mix} = -(c_1 \ln c_1 + c_2 \ln c_2 + \dots + c_n \ln c_n) = -R \sum_{i=0}^n c_i \ln c_i \tag{1}$$

式中, R 为摩尔气体常数。

根据式(1)计算出合金的混合熵值见表 2。根据熵值的不同可将试验钎料合金分为 3 类,低熵钎料合金 A₁、中熵钎料合金 A₂ 和 A₃、高熵钎料合金 A₄。

表 2 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 钎料合金的混合熵

合金编号	合金混合熵值/(J · mol ⁻¹ · K ⁻¹)
A ₁	0.78 R
A ₂	1.23 R
A ₃	1.50 R
A ₄	1.61 R

图 2 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的 XRD 图。结

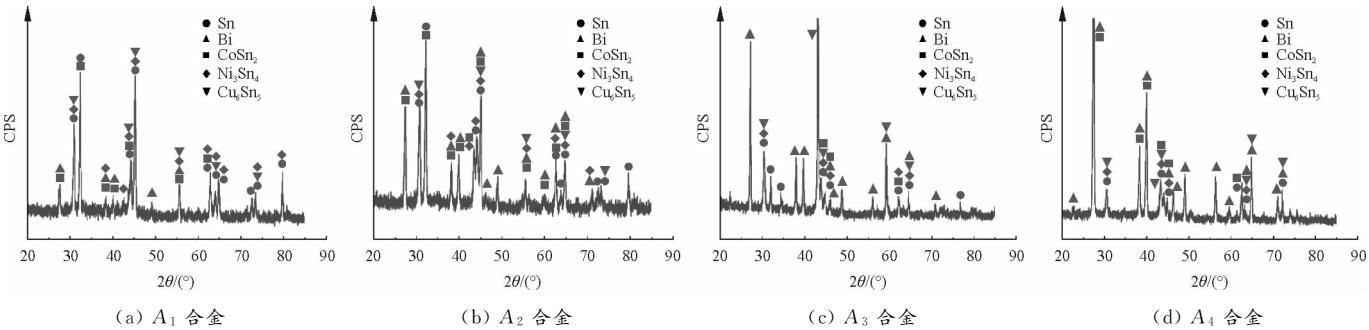


图 2 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of Sn-Cu-Co-Ni-Bi series solder alloys

果表明,4 种合金的物相有 Sn 相、Bi 相、CoSn₂ 相、Ni₃Sn₄相和 Cu₆Sn₅相。随着合金混合熵的增加,物相种类没有发生变化,只是衍射峰强度发生了变化,说明不同钎料合金组织中相含量有所差异。随着合金混合熵值增加至 1.23 R,钎料合金的成分发生了相应的变化。低熵钎料合金的 Sn 含量较高,组织中 Sn 基体较多,固溶体含量较低,所以 Sn 基相的衍射峰较高。随着合金混合熵进一步增加,组织中固溶体含量增高,Sn 基体含量降低,所以 Sn 基相的衍射峰继续降低,固溶体结构的衍射峰逐渐变高。随着合金混合熵继续增加,不同相在组织中的含量有所改变,图谱中的衍射峰强度也呈现出不同的趋势。

2.2 钎料合金的组织演化规律

图 3 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的 SEM 组织和 EDS 元素面分析图。可以看出,钎料合金组织主要

由浅灰色、深灰色和白色区域组成。图 4 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金中 Sn 基体和固溶体的体积分数。可以看出,随混合熵增大,合金组织中的 Sn 基体逐渐减少,固溶体逐渐增多。为确定钎料合金组织中的物相种类,采用 EDS 能谱分析各相的成分,再结合 XRD 结果,确定相的种类,结果见表 3。结合表 3 可以看出,图 3 中浅灰色区域是 Sn 基体,而深灰色区域同时含有 Cu₆Sn₅相、Ni₃Sn₄相和 CoSn₂相,为 Sn 基固溶体结构。白色区域为含 Bi 相,因为 Bi 在 Sn 中的固溶度较低,所以在低熵钎料合金的组织中以细小颗粒状分布在 Sn 基体中。随着合金混合熵增大,Bi 相析出较多,分布在 Sn 基体和固溶体之间的区域。钎料合金的微观组织是由固溶体和析出相组成。随着混合熵值增大,钎料合金组织中的固溶体含量逐渐增大,Sn 基体含量逐渐降低,因为 Bi 元素在其他元素中的固溶度较低,所以以单质形

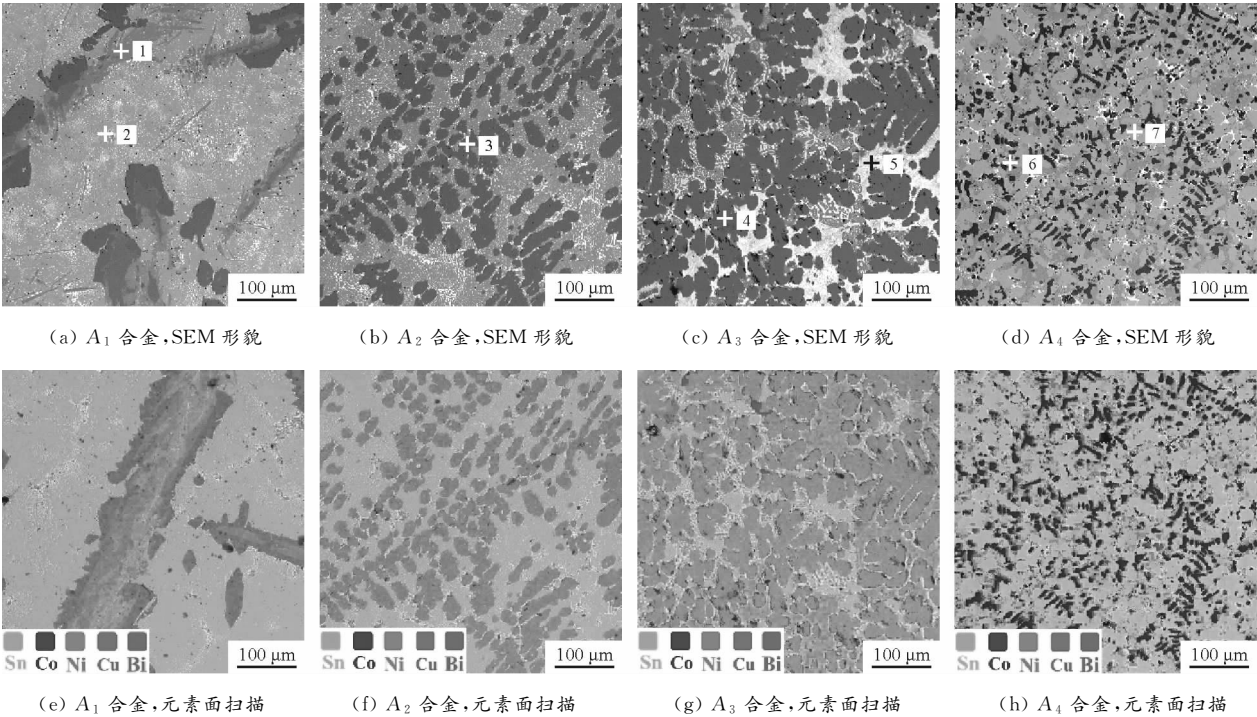


图 3 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 钎料合金的 SEM 微观组织和 EDS 面分析图

Fig.3 SEM microstructure and EDS surface analysis of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloy

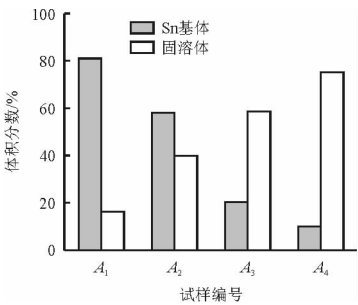


图 4 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 钎料合金中 Sn 基体和固溶体相体积分数
Fig.4 Volume fraction of solid solution phase and Sn matrix in Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloy

表 3 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 钎料合金的 EDS 点成分分析

Tab.3 EDS point composition analysis of Sn-Cu-Co-Ni-Bi

solder alloys						
点	$x_B/\%$					相组成
	Sn	Cu	Co	Ni	Bi	
1	61.08	15.24	13.84	9.84	-	Cu_6Sn_5 、Sn
2	65.42	-	-	-	34.58	Sn、Bi
3	48.61	10.93	22.73	17.73	-	Cu_6Sn_5 、 Ni_3Sn_4
4	47.26	12.40	21.21	19.13	-	Cu_6Sn_5 、 Ni_3Sn_4 、 CoSn_2
5	-	-	-	-	100	Bi
6	10.82	11.02	63.63	14.53	-	CoSn_2 、 Cu_6Sn_5 、 Ni_3Sn_4
7	59.46	-	-	40.54	-	Ni_3Sn_4

态的 Bi 相存在于晶界,且枝晶在组织内分布变得更加均匀,通过面成分分析可看到,Co 元素分布较均匀。

当钎料合金的混合熵为 0.78 R 时,合金中 Sn 含量较高,并且分布着许多白色的 Bi 相,此时合金组织内的 Cu_6Sn_5 相、 Ni_3Sn_4 相和 CoSn_2 相形成的固溶体数量较少,见图 3a。随着合金混合熵增大为 1.50 R,组织中出现树枝状晶粒,且分布比较均匀。混合熵继续增大,合金中的枝晶形貌也发生明显变化,晶粒变得粗大饱满,相分布逐渐均匀,在枝晶间隙分布着大量白色的 Bi 相,并且相的边界越来越清晰。当钎料合金为高熵成分时,Sn 基体逐渐减少,固溶体相的体积分数逐渐增多。此外,高熵钎料合金的微观组织形貌也发生了较大的变化,枝晶在组织内分布变得更加均匀,呈现致密的交错结构,见图 3d。

2.3 熵值对钎料合金硬度的影响

图 5 为不同成分的 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的硬度。可以看出,钎料合金的布氏硬度和维氏硬度均随合金混合熵的增加而增加,且变化幅度都较大。 A_4 合金的硬度最大,布氏硬度(HB)和维氏硬度(HV)最大分别为 158 和 410。 A_1 合金的硬度最小,布氏硬度(HB)和维氏硬度(HV)分别为 32.48 和 61.5。

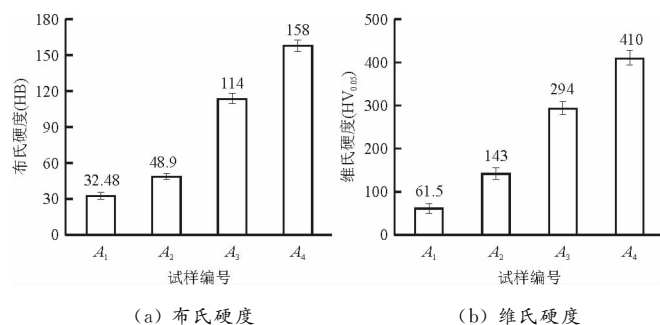


图 5 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的硬度

Fig.5 Hardness of Sn-Cu-Co-Ni-Bi series solder alloys

当钎料合金的混合熵为低熵和中熵时,合金的布氏硬度相差不大,当钎料合金为高熵合金时,布氏硬度大幅增加。这是因为低熵的钎料合金中 Sn 基体较多,合金内部的金属间化合物和硬质相比较少,此时硬度也较低。当合金为中熵合金时,合金中的 Sn 基体转变成硬度较高的 Sn 基固溶体相,所以钎料合金的硬度有所上升。当合金的混合熵为高熵时,合金中形成 BCC 固溶体结构,相关研究表明,BCC 相的强度和硬度较高,原子分布在每个晶胞和体心的位置,不同原子之间的相互作用使键长发生改变,最终使合金发生了严重晶格畸变,阻碍了位错的运动,所以钎料合金的硬度显著提高。

2.4 熵值对钎料合金抗拉强度的影响

图 6 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的抗拉强度。可以看出,钎料合金的抗拉强度随着混合熵的增加呈先增后减的趋势,中熵钎料 A_2 合金的抗拉强度最大,为 47.7 MPa。高熵钎料 A_4 合金的抗拉强度最小,为 13.8 MPa。

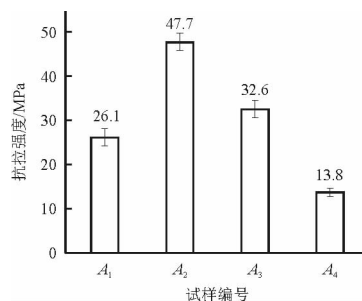


图 6 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的抗拉强度

Fig.6 Tensile strength of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys

低熵钎料合金中 Sn 含量较高,组织中形成的 Sn 基体较多,导致合金的抗拉强度较低。随着混合熵增加,合金中的 Sn 基体转变成强度较高的 Sn 基固溶体,同时合金组织中的 CoSn_2 相析出量越来越多,且逐渐变得粗大,这些固溶体能增加钎料合金的抗拉强度。然而, A_4 合金的抗拉强度却较低,这是因为合金中 Bi 元素在其他元素中的固溶度较低。随着混合熵增大,合金组织中 Bi 含量逐渐增加,单质形态的 Bi 相逐渐增多,Bi 脆性较大,且大量分布于晶界,导致合金抗拉强度降低。

2.5 钎料合金的断口形貌

图 7 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的拉伸断口 SEM 形貌。可以看出,钎料合金在拉伸过程中的塑性变形程度很低,试样断裂前没有明显的颈缩现象,且断口比较粗糙,因此钎料合金的断裂方式为脆性断裂。

结合 SEM 和 EDS 分析可知,当合金混合熵为低熵时,合金组织中的 Sn 基体较多,固溶体较少,所以主要是 Sn 基体的断裂,还有少量的 Bi 相,断裂方式为穿晶断裂。随着合金混合熵的增大,组织中的 Sn 基体转化为 Sn 基固溶体,且在 Sn 基固溶体的缝隙间有白色的 Bi 相。钎料合金的断口比较粗糙,呈结晶状,并且颜色较暗,整体形貌呈“冰糖状”,由此可以确定其断裂方式为沿晶断裂^[24-25]。随着合金混合熵继续增大,高熵成分的钎料合金断口有“河流状”的花样,这是在试样拉伸的过程中,在拉应力的作用下,原子间的结合键沿一定的晶面被破坏。此外,还可看到台阶状的解理层,且解理层之间相互交错,裂纹断裂主要为穿层断裂和部分沿层断裂,因此确定断裂方式为沿晶断裂。高熵成分的钎料合金组织中有大量的白色 Bi 相,且随着熵值增大,单质

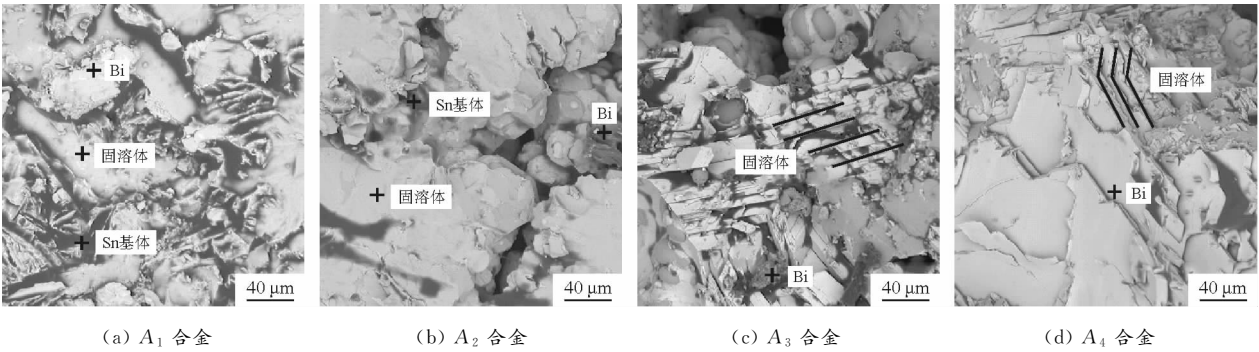


图 7 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys

形态的 Bi 相逐渐增多,Bi 相较脆,这是造成合金断裂的主要原因。

2.6 熵值对钎料合金熔化特性的影响

图 8 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的 DSC 曲线,上侧曲线为熔化曲线,下侧曲线为凝固曲线。通过图 8 可以计算出钎料合金的熔点和熔程。钎料合金的熔化起始温度,即固相线温度为曲线开始偏离基线点处的切线和曲线最大斜率的交点,熔化终止温度(液相线)为曲线的峰值温度,计算结果见表 4。可以看出熔点变化幅度较大。A₁ 合金和 A₃ 合金的熔点分别为 191 和 138 ℃,属于低温软钎料,但是 A₁ 合金的熔程达到了 18 ℃,这可能会导致焊接性能下降。A₃ 合金的熔点低于 A₂ 合金的熔点,可能是 A₃ 合金成分更接近多元合金的共晶点。A₂ 和 A₄ 合金的熔点为 225 和 269 ℃,符合高温软钎料的熔点范围并且这两种合金的熔程分

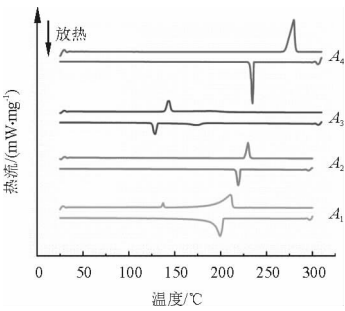


图 8 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的 DSC 曲线

Fig.8 DSC curves of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys

表 4 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的熔点和熔程

Tab.4 Melting points and melting ranges of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys

Ni-Bi solder alloys		
钎料合金	熔点/℃	熔程/℃
A ₁	191	18
A ₂	225	5
A ₃	138	5
A ₄	269	10

别是 5 和 10 ℃,更有利于形成良好的焊接接头。

2.7 熵值对钎料合金的耐腐蚀性的影响

图 9 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金在不同腐蚀时间下的微观组织。可以看出,对于同一种成分的钎料合金来说,随着盐雾腐蚀时间延长,钎料合金的腐蚀程度也越来越大。当盐雾腐蚀时间一定时,随着合金混合熵的增加,钎料合金被腐蚀的程度逐渐降低,即高熵成分的钎料合金耐盐雾腐蚀性能更优。

在低熵钎料合金的组织中存在枝晶结构,主要以 Sn 基体和固溶体组成,还有少量的 Bi 相,相界也比较清晰,表面光亮整洁,未发现明显被氧化区域。当盐雾腐蚀 100 h 后,钎料合金组织表面有明显的腐蚀痕迹,但枝晶结构和枝晶间结构依然可见。盐雾腐蚀 200 h 后,钎料合金微观组织表面覆盖着一层均匀的腐蚀产物,氧化区域也明显增加,开始出现大小不一的蚀坑,枝晶形貌开始变得模糊。随着合金混合熵的增加,钎料合金被腐蚀的程度逐渐降低,说明熵值较高的钎料合金耐腐蚀性能较好。当盐雾腐蚀 300 h 后,腐蚀程度进一步增大,蚀坑也变深,并且蚀坑内部腐蚀最严重。分析可知 Sn 基体被腐蚀最严重,一些金属间氧化物随着 Sn 基体腐蚀而从主体上脱落。高熵钎料合金不易形成金属间化合物或者其他的有序相,大多形成单相固溶体结构,而单相固溶体结构的耐腐蚀性能优于金属间化合物。

图 10 为钎料合金试样在不同腐蚀时间下的质量损失率。对于同一合金成分来说,质量损失率随着盐雾腐蚀时间延长而逐渐增大,即盐雾腐蚀时间越长,腐蚀程度越剧烈。但是,质量损失率与盐雾腐蚀时间并非呈一定比例增加。当盐雾腐蚀时间一定时,随着合金混合熵的增加,钎料合金的质量损失率逐渐降低,这也说明了熵值较高的钎料合金耐腐蚀性较强。

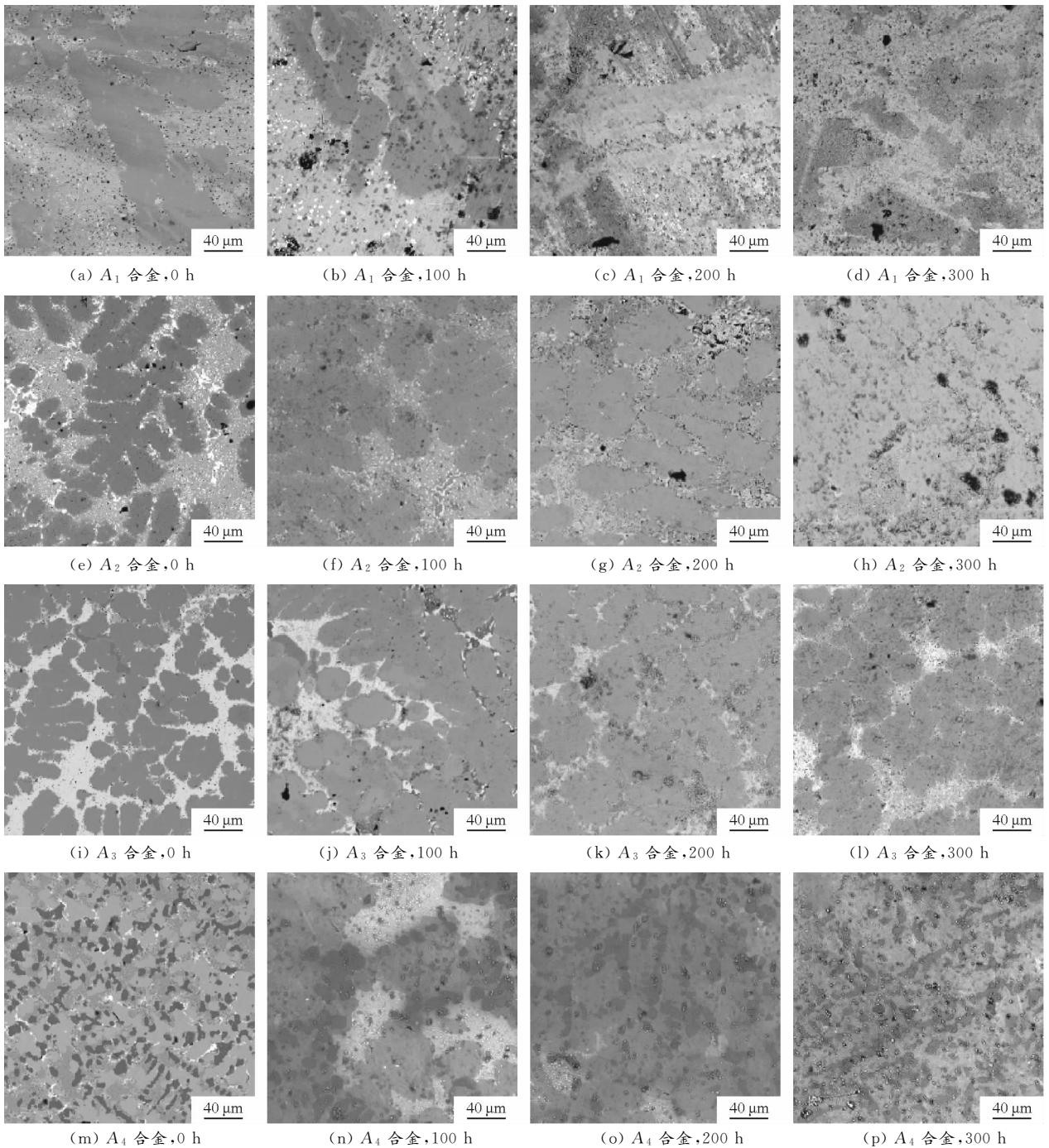


图 9 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金在 5% 的 NaCl 中腐蚀不同时间后的微观组织

Fig.9 Microstructure of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys after corrosion in 5% NaCl for different time

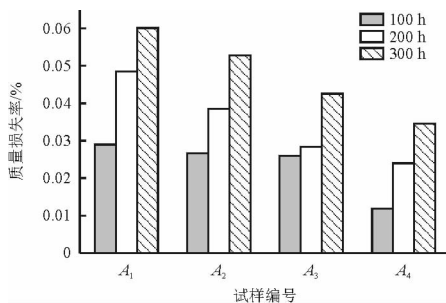


图 10 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金盐雾腐蚀后的质量损失率

Fig.10 Weight loss rate of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys after salt spray corrosion

2.8 熵值对钎料合金电阻率的影响

图 11 为 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的电阻率。可以看出, 钎料合金电阻率的范围为 $0.182 \sim 1.250 \mu\Omega \cdot \text{m}$, 且电阻率随着混合熵的增大而逐渐增加。A₁ 钎料合金的电阻率为 $0.182 \mu\Omega \cdot \text{m}$ 。随着合金混合熵的增大, Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金电阻率由 $0.524 \mu\Omega \cdot \text{m}$ (A₂ 合金) 增大至 $1.250 \mu\Omega \cdot \text{m}$ (A₄ 合金)。这是因为相对于低熵合金而言, 高熵合金严重的晶格畸变效应使组织中不同尺寸的原子位置发生偏移, 这些原子的位置有较大的随机性, 能够导致钎料合金的

形成焓较高,造成合金的电阻率增大,从而导致钎料合金的导电性减弱。

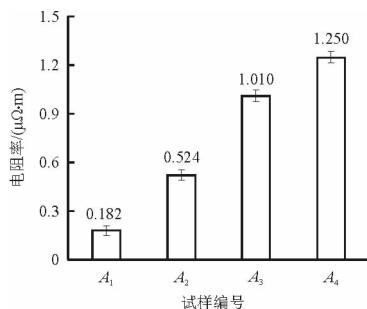


图 11 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金的电阻率

Fig.11 Resistivity of Sn-Cu-Co-Ni-Bi solder alloys

3 结 论

(1)Sn-Cu-Co-Ni-Bi 钎料合金的微观组织是由固溶体和析出相组成。随着混合熵值增大,钎料合金组织中的固溶体含量逐渐增多,Sn 基体含量逐渐降低。因为 Bi 元素在其他元素中的固溶度较低,因此以单质形态的 Bi 相存在于晶界。

(2)Sn-Cu-Co-Ni-Bi 系钎料合金硬度随着合金混合熵的增大而逐渐增大,维氏硬度(HV_{0.5})最大值为 410,布氏硬度(HB)最大为 158,抗拉强度呈先增后减的趋势,最大值为 47.7 MPa,最小值为 13.8 MPa,钎料合金的断裂方式为脆性断裂。

(3)随着合金混合熵增大,熔点呈现出先增大后减小的趋势,其中 Sn-Cu-Co-Ni-Bi 的熔点范围为 138~269 ℃,耐腐蚀性能呈现出逐渐增大趋势;电阻率范围为 0.182~1.250 μΩ·m,呈逐渐增大趋势。

(4)Sn₆₀Cu₁₀Co₁₀Ni₁₀Bi₁₀、Sn₂₀Cu₂₀Co₂₀Ni₂₀Bi₂₀ 合金适合作为高温无铅软钎料使用。

参 考 文 献

- [1] 戎万, 操齐高, 郑晶, 等. 高温钎料焊膏研究进展[J]. 贵金属, 2020, 41(S1): 43-47.
- [2] 王刘珏, 薛松柏, 刘哈, 等. 电子封装用 Au-20Sn 钎料研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2 483-2 489.
- [3] 郭永权. Sn-Cu-Ni 系钎料的研究现状[J]. 焊接, 2015(12): 16-23.
- [4] 姜乃政. 高温无铅钎料制备及其性能分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [5] 樊江磊, 翟恒涛, 刘占云, 等. Sn-Cu-Ni 系无铅钎料研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(5): 1-6.
- [6] 王艳. ZnAlMg 基高温无铅钎料的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] 马良, 尹立孟, 洗健威, 等. 高温电子封装无铅化的研究进展[J]. 焊接技术, 2009, 38(5): 6-10.
- [8] HE H, HUANG S, XIAO Y, et al. Diffusion reaction-induced microstructure and strength evolution of Cu joints bonded with Sn-based solder containing Ni-foam[J]. Materials Letters, 2020, 281(3): 128 642.
- [9] MAHMUDI R, ESLAMI M. Shear strength of the Zn-Sn high-

temperature lead-free solders[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2011, 22(8): 1 168-1 172.

- [10] CHANG C W, LIN K L. High-temperature mechanical properties of Zn-based high-temperature lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(1): 135-141.
- [11] 樊江磊, 王宁格, 魏泽新, 等. 高温无铅软钎料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(6): 726-731.
- [12] ZENG G, MCDONALD S, NOGITA K. Development of high-temperature solders[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(7): 1 306-1 322.
- [13] 方继恒, 谢明, 张吉明, 等. 金/钯基贵金属钎料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1 659-1 669.
- [14] 刘占云. Co 含量对 Sn-0.7Cu 无铅钎料合金组织和钎焊性能的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019.
- [15] 王子伊, 薛松柏, 王剑豪, 等. 添加合金元素改善 Au-Ge 钎料组织及性能的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23): 23 145-23 153.
- [16] 刘哈, 薛松柏, 王刘珏, 等. 金基中低温钎料的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3 189-3 195.
- [17] 樊融融. 现代电子装联焊接技术基础及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [18] 顾露云. 表面组装技术(SMT)基础与可制造性设计(DFM)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [19] 韦小凤, 王日初, 彭超群, 等. AuSn₂₀/Ni 焊点的界面反应及剪切强度[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1 907-1 913.
- [20] ZHANG G S, JING H Y, XU L Y, et al. Creep behavior of eutectic 80Au/20Sn solder alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 476(1): 138-141.
- [21] CHIDAMBARAM V, HALD J, HATTEL J. Development of Au-Ge based candidate alloys as an alternative to high-lead content solders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 490(1-2): 170-179.
- [22] 马雪龙. CoCrFeNiAlMo_x 系高熵合金组织和性能的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [23] 栾高灿, 高鹏, 董可伟, 等. Ni₃Al 对 CoCrFeNi 高熵合金组织与性能的影响[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 41-46.
- [24] 彭浩. ZnO 增强 Sn3.0Ag0.5Cu 无铅焊料组织性能及热迁移行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [25] 赫尔. 断口形貌学观察、测量和分析断口表面形貌的科学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |