文章编号:1000-5854(2026)04-0426-07

Ag 含量对 SnBi58Sb3 易熔合金性能的影响

张毓良，　李明亚，　杨文琪

(东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院,河北省电介质与电解质功能材料重点实验室,河北 秦皇岛　066004)

摘　要:为改善 SnBi58Sb3 易熔合金的综合性能,向 SnBi58Sb3 合金中加入不同质量分数(0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)的 Ag 元素,研究了 Ag 添加量对 SnBi58Sb3 合金的物相组成、显微结构、力学性能及熔化特性的影响规律,并分析了其作用机制.结果表明,Ag 元素的加入可细化合金组织,使脆硬富 Bi 相分布更加均匀,提高了合金的抗拉强度和塑性.当 Ag 含量为 0.2%时,合金的抗拉强度和断后伸长率达到了最高值,抗拉强度为 81.3 MPa,断后伸长率为 16%.同时,Ag 含量对合金熔化特性的影响较小,改性后合金的熔点、熔程及熔化潜热仍能满足易熔合金的实际使用要求.本研究为易熔合金的性能优化提供了理论参考.

关键词:合金化; 易熔合金; 熔化性能; 力学性能; 显微组织

中图分类号:TG 146.1　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202603010

Effect of Ag content on properties of SnBi58Sb3 fusible alloy

Zhang Yuliang,　Li Mingya,　Yang Wenqi

(School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao,
Hebei Key Laboratory of Dielectric and Electrolyte Functional Material, Qinhuangdao Hebei　066004, China)

Abstract: To improve the comprehensive performance of SnBi58Sb3 fusible alloy, Ag element with different mass fractions(0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%) was added into SnBi58Sb3 alloy. The effects of Ag addition content on the phase composition, microstructure, mechanical properties and melting characteristics of SnBi58Sb3 alloy were investigated, and the corresponding mechanism was analyzed. The results show that Ag addition can refine the alloy structure, make the distribution of brittle Bi-rich phase more uniformly, and also improve the tensile strength and ductility of the alloy. When the Ag content is 0.2%, the tensile strength and elongation at break of the alloy reach the maximum values of 81.3 MPa and 16%, respectively. Meanwhile, Ag content has little effect on the melting characteristics of the alloy. The melting points, melting ranges and latent heats of fusion for the modified alloys can still meet the practical application requirements of fusible alloys. This study provides a theoretical reference for the performance optimization of fusible alloys.

Key words: alloying; fusible alloy; melting performance; mechanical property; microstructure

低熔点合金主要由 Sn、Bi、Pb、In、Sb、Zn 等金属按一定配比构成多组元合金[1],其熔点一般小于或等于 Sn-Pb 共晶合金(183 ℃),因此也被称作易熔合金[2].这类合金常用作熔断器、易熔塞等感温元件中的“开关材料”,当系统出现过载电流或环境温度超过合金熔点时,合金可快速熔化并切断工作回路,从而实现对系统

收稿日期:2024-11-05; **修回日期**:2025-07-26

基金项目:河北省电介质与电解质重点实验室后补助经费项目(22567627H)

作者简介:张毓良(1999-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为低熔点合金研制与测试.

通信作者:李明亚(1974-),男,教授,硕士生导师,研究方向为功能材料.E-mail:limingya@neuq.edu.cn

中其他精密元件的保护[3-5].因此,易熔合金的良好熔化特性和优良力学性能是保障感温元件动作精准、可靠性高、响应迅速的前提.其中 Sn-Bi-Sb 系合金具有熔点较低、成本低、无毒等优势,可有效降低焊接温度,减少基材热损伤,避免基材高温变形或氧化[6-7],在低熔点合金领域受到广泛关注.然而,该类合金存在脆性大、延展性小等缺点.Sb 元素含量过高时,合金内部会生成 Sn_3Sb_2 金属间化合物(intermetallic compound,IMC),该相成为裂纹源,导致合金延展性下降;同时,Bi 元素在合金中易形成粗大不规则的晶粒组织,且存在明显的偏聚现象,容易导致合金脆性断裂,极大限制了 Sn-Bi-Sb 三元合金的实际应用.目前,合金化是改善低熔点合金性能的主要方法.为改善 Sn-Bi-Sb 系合金的力学性能,通常向合金中加入适量合金化元素.研究表明,Cu、Al、Ni 等元素可与基体元素反应生成金属间化合物,细化合金微观组织、优化第二相分布,从而提高其抗拉强度和延展性.例如,适量 Cu 的加入可促使合金中生成 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 金属间化合物,有效细化 SnSb 相,进而优化合金的力学性能[8-10].

相较于常见的合金化元素,Ag 作为一种有效的合金化元素,在提高合金性能方面展现出独特的优势.Ag 与 Sn 生成的 Ag_3Sn 金属间化合物可作为异质形核核心,细化合金晶粒,并增强第二相强化效应,进而改善合金的微观结构和力学性能[11-15].同时,Ag 的加入可改善合金的导电性和导热性,使合金在高导电性和良好热稳定性需求场景中更具竞争力和应用价值.因此,本文中,笔者以 SnBi58Sb3 为基体合金,系统研究了 Ag 添加量对合金微观结构及力学性能的影响,旨在通过优化 Ag 添加量,提升该合金的综合性能,为 Sn-Bi-Sb 系易熔合金的进一步优化提供理论依据.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

Sn 块、Bi 块(纯度均为 99.99%)购于北京兴荣源科技有限公司,Sb 块、Ag 粒、Cu 粒(纯度均为 99.99%)购于北京佳铭铂业有色金属有限公司,KCl 熔盐、LiCl 熔盐(纯度均为 99.95%)购于北京市通广精细化工公司.

SmartLab X 射线衍射仪(XRD,日本理学公司);Regulus8100 型扫描电子显微镜(SEM,日立公司)及配套能量色散 X 射线能谱仪(EDS);WDW3100 型电子万能试验机(长春科新试验仪器有限公司);DMI 5000M 金相显微镜(德国徕卡公司);HCT-2 型热分析仪(北京恒久科学仪器厂).

1.2 样品的制备

按照 $m(KCl):m(LiCl)=1.3:1$ 配制 KCl-LiCl 混合熔盐覆盖剂,加入到石墨坩埚中,搅拌均匀后,置于箱式电阻炉中并升温至 500 ℃使熔盐覆盖剂完全熔化.再根据目标合金的元素质量分数称取各金属块,置于盛有熔盐的坩埚中,确保熔盐能够完全覆盖金属.随后置于 700 ℃箱式电阻炉中熔炼 120 min,熔炼期间每隔 15 min 用石英玻璃棒对液态合金进行机械搅拌,保证合金成分均匀化.熔炼完成后,将液态合金浇铸至石墨模具中快速冷却,冷却后进行脱模,得到不同组分合金样品.

1.3 物相分析

采用 XRD 对合金进行物相分析,设置为连续扫描模式,扫描范围 10°~90°,扫描速率 5 (°)/min.

1.4 微观组织分析

将熔炼好的合金切成尺寸适宜的块状样品,使用亚克力粉冷镶样品制得金相样.对镶嵌完成的样品进行平整、减薄、打磨、抛光、清洗处理后,使用体积分数为 4%的硝酸酒精溶液对样品表面腐蚀 10 s,再置于去离子水中超声清洗 5 min,完成制备.利用金相显微镜观察合金的金相组织,采用 SEM 观察合金的微观形貌,并通过 EDS 分析合金中的元素分布.

1.5 力学性能测试

利用电子万能试验机对加工好的标准拉伸试棒进行单向静拉伸测试,拉伸应变率设为 $1\times10^{-2}\ s^{-1}$,每种合金重复测试 3 次,取平均值,得到不同组分合金的抗拉强度和断后伸长率.

1.6 热性能测试

借助热分析仪对合金进行热性能测试,得到合金的熔点、熔程及熔化潜热.测试时在每种合金的相同部位取 3 块 10 mg 样品.测试条件:升降温速率为 10 ℃/min,保护气为氩气,气体流速为 50 mL/min,温度为 25~200 ℃.

1.7 理论计算合金相变过程

为深入分析 Ag 元素添加至 Sn-Bi-Sb 合金后，合金在冷却过程中各相凝固情况，采用 JMatPro 软件对 SnBi58Sb3 基体合金和 SnBi58Sb3Ag0.8 改性合金的冷却凝固过程进行模拟计算.参数设置如下：合金类型选择 Solder Alloy，按照质量百分比输入合金成分；在 Solidification 模块中选择 Phases and Properties，设定起始温度 700 ℃、终止温度 25 ℃、步长 10 ℃，得到冷却凝固曲线；在 Thermodymamic Properties 模块中选择 Step Temperature，设定起始温度 700 ℃、终止温度 10 ℃、步长 10 ℃，得到冷却凝固析晶曲线.

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 1 为 SnBi58Sb3Agx（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的 XRD 图谱.由图 1a 可知，SnBi58Sb3 基体合金主要由 Sn 相、Bi 相和 SnSb 相组成.Bi 相的特征衍射峰位于 22°～27°、37°～39°、45°～49°、56°、62°、71°、73°、80°处，Sn 相的特征衍射峰位于 30°～32°、44°～46°、51°～55°、64°处，SnSb 相的特征衍射峰位于 29°、42°、59°、67°、72°处.Ag 改性合金的 XRD 图谱中未出现 Ag_3Sn 金属间化合物的特征衍射峰，可能是由于 Ag 添加量较少，生成的 Ag_3Sn 相含量过少，低于 XRD 的检测阈值，或者使用块状样品时，可能存在择优取向现象，影响 XRD 检测结果.图 1b 显示，随着 Ag 含量的增加，Bi 相的衍射峰强度逐渐降低，这是由于 Ag 的加入可有效细化晶粒，而小晶粒的衍射峰强度通常低于大晶粒.由图 1c 可以看出，SnSb 相的衍射峰强度随着 Ag 含量的增加而增强，且当 Ag 含量为 0.2%时，SnSb 相的衍射峰强度最低.

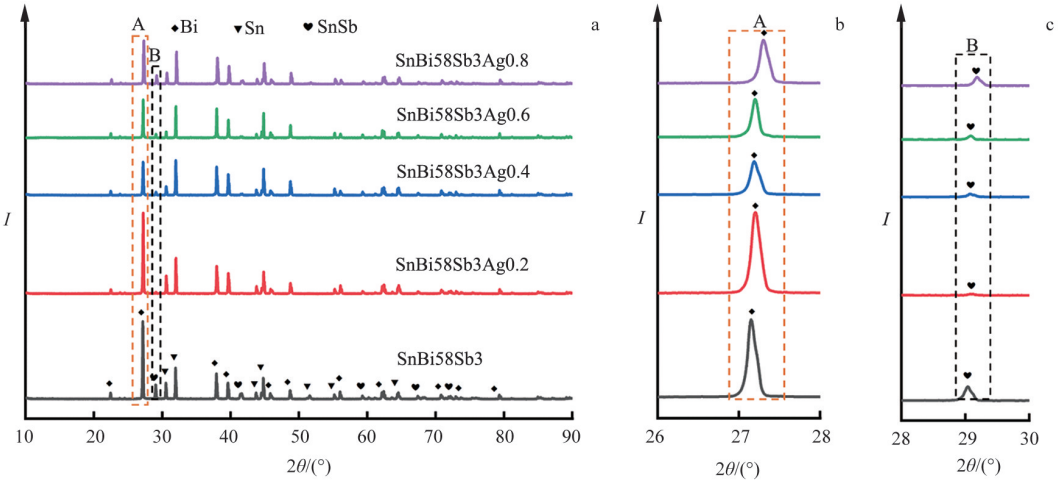


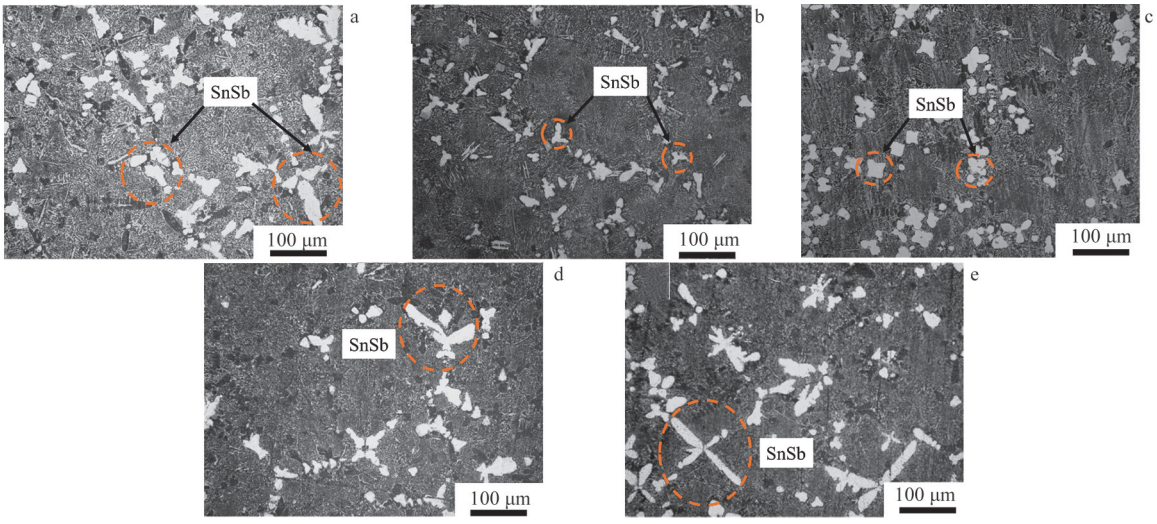
图 1 SnBi58Sb3Agx（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的 XRD 图谱(a)及 A(b)、B 区(c)放大图

Fig.1 XRD patterns of SnBi58Sb3Agx（x=0,0.2,0.4,0.6,0.8） fusible alloys(a),enlarged images of region A(b) and B(c)

2.2 合金相显微组织

图 2a 为 SnBi58Sb3 基体合金的金相形貌，该合金主要由灰色条状相和浅色基体相组成，同时基体相中存在一些针状和颗粒状微观组织.灰色条状相富含 Bi，浅色块状相则富含 Sn，SnSb 相呈四棱长条状.当 Ag 含量为 0.2%时，合金内部 SnSb 相尺寸细小且分布均匀，组织细化效果明显（图 2b）；Ag 含量增至 0.4%时，合金中第二相晶粒尺寸增大（图 2c）；Ag 含量进一步增至 0.6%时，第二相开始由小块状变为长条状，晶粒进一步粗化（图 2d）；Ag 含量继续增至 0.8%时，长条状第二相尺寸进一步增大，晶粒粗化程度更显著（图 2e）.一方面是因为在低添加量（如 0.2%）时，Ag 原子可富集于 Bi、Sb 相晶界处，通过增加晶界能量阻碍晶粒的合并和生长，显著抑制晶粒粗化；另一方面随着少量 Ag 的加入，第二相析出，提供异质形核位点，进一步促进晶粒细化.当 Ag 含量增至 0.4%及以上时，合金内部相组成与相间相互作用发生改变，导致 Ag 与 Bi 或 Sb 之间的相互作用减弱，对晶粒生长的抑制效果下降，晶粒生长速率加快，导致晶粒粗化.

基体相中的针状和颗粒状组织是在温度降低过程中，由于 Bi 在富 Sn 相中的溶解度减小而析出，可能还含有 Ag_3Sn 和 SnSb 等金属间化合物.为了确定合金的物相组成与元素分布特征，对 SnBi58Ag3Sb0.8 改性合金进行了 SEM 和 EDS 分析，结果如图 3a～g 所示.整体来看，Ag 元素在合金中呈现出较为集中的分布特征.结果证实了 Ag 元素与 Sn 元素发生反应，在合金内生成了 Ag_3Sn 金属间化合物.



a.SnBi58Sb3；b.SnBi58Sb3Ag0.2；c.SnBi58Sb3Ag0.4；d.SnBi58Sb3Ag0.6；e.SnBi58Sb3Ag0.8.

图 2　SnBi58Sb3Agx（x＝0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的金相显微组织

Fig.2　Metallographic microstructures of SnBi58Sb3Agx（x＝0，0.2，0.4，0.6，0.8）fusible alloys

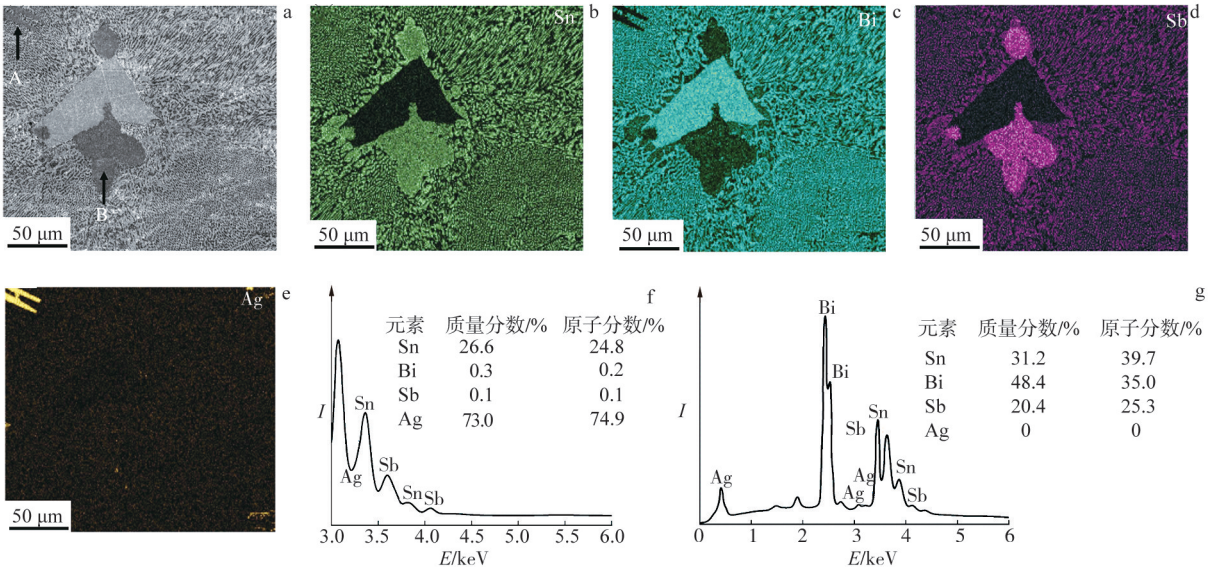


图 3　SnBi58Sb3Ag0.8 易熔合金的 SEM 图(a)、EDS 元素分布图(b～e)和 A(f)、B(g)区的 EDS 能谱图

Fig.3　SEM image(a), EDS elemental mappings(b～e) of SnBi58Sb3Ag0.8 fusible alloys and EDS spectra of region A(f) and B(g)

2.3　力学性能

低熔点合金作为安全开关的核心材料，其优异的力学性能能够提高器件的安全可靠性.SnBi58Sb3Agx（x＝0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的力学性能测试结果如图 4 所示.图 4a 为 5 种合金的拉伸载荷-位移曲线，图 4b 给出了不同合金的抗拉强度与断后伸长率.由图可知，相较于 SnBi58Sb3 基体合金，Ag 改性合金的力学性能整体提高，且随着 Ag 含量的增加，抗拉强度和断后伸长率均呈现先升高后降低的趋势，其中抗拉强度的增幅相对平缓.当 Ag 含量为 0.2%时，合金的综合力学性能最优，抗拉强度为 81.13 MPa，较基体合金(76.12 MPa)提升了 6.58%，断后伸长率可达 16%，较基体合金(8%)提高了一倍，说明适量 Ag 的加入显著提升了合金的塑性.这是由于适量 Ag 元素可与基体中的 Sn 元素反应生成更稳定的 Ag_3Sn 金属间化合物，有效抑制 Bi 相的析出，降低合金中脆性 Bi 相的相对含量.同时，Ag_3Sn 可作为异质形核核心，显著细化晶粒组织.晶粒越细小，对位错运动的阻碍作用越显著，滑移面数量的增加有助于应力释放，从而提升了断后伸长率.但随着 Ag 含量的增加，细化效果降低，第二相强化起主导作用，因此断后伸长率下降.

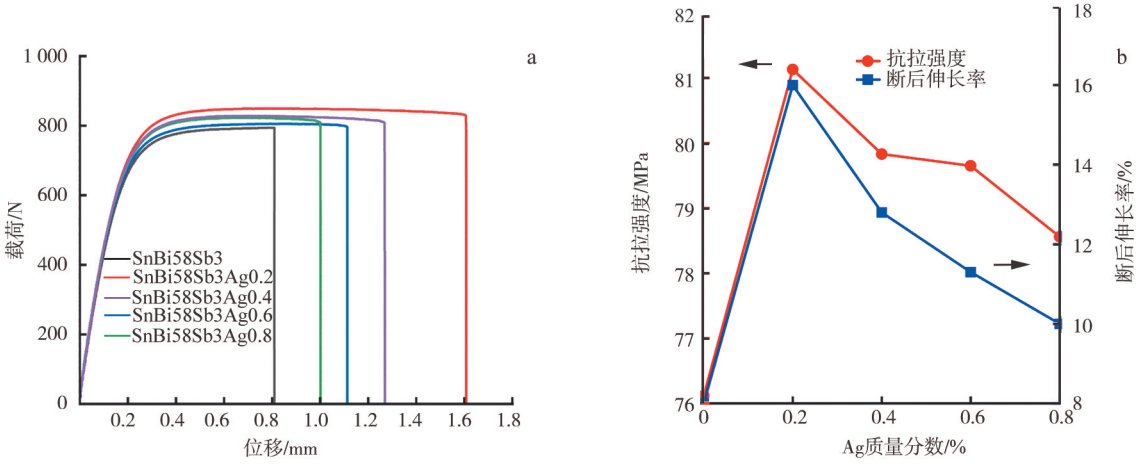


图 4　SnBi58Sb3Agx（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的载荷-位移曲线（a）及抗拉强度和断后伸长率（b）

Fig.4　Load-displacement curves(a), tensile strength and elongation at break(b) of SnBi58Sb3Agx (x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) fusible alloys

2.4　熔化特性

图 5 为 SnBi58Sb3Ag（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的 DSC 熔化特性曲线，由曲线提取得到不同合金的熔点、熔程及熔化潜热（见表 1）.可以看到，相较于 SnBi58Sb3 基体合金，除 SnBi58Sb3Ag0.6 改性合金的熔点略有降低外，其余改性合金的熔点均有一定提升，而所有改性合金的熔程与熔化潜热均明显降低.其中，SnBi58Sb3Ag0.8 改性合金表现出最优的熔化特性，其熔程和熔化潜热最小，分别为 3.6 ℃和 34.3 J/g.整体而言，改性合金的熔点为 138.1～142.3 ℃，熔程为 3.6～5.3 ℃.结合表 1 数据可知，Ag 元素的添加可提高基体合金的熔点，但熔点随 Ag 添加量提升的变化幅度较小.同时，Ag 元素的加入能有效降低易熔合金的熔程和熔化潜热，仍可满足易熔合金的使用要求.

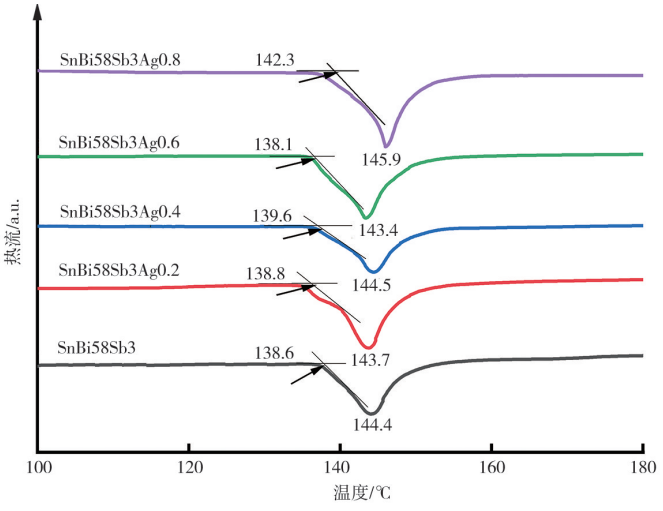


图 5　SnBi58Sb3Agx（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的 DSC 熔化特性曲线

Fig.5　DSC melting characteristic curves of SnBi58Sb3Agx (x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) fusible alloys

表 1　SnBi58Sb3Agx（x=0、0.2、0.4、0.6、0.8）易熔合金的熔点、熔程和熔化潜热

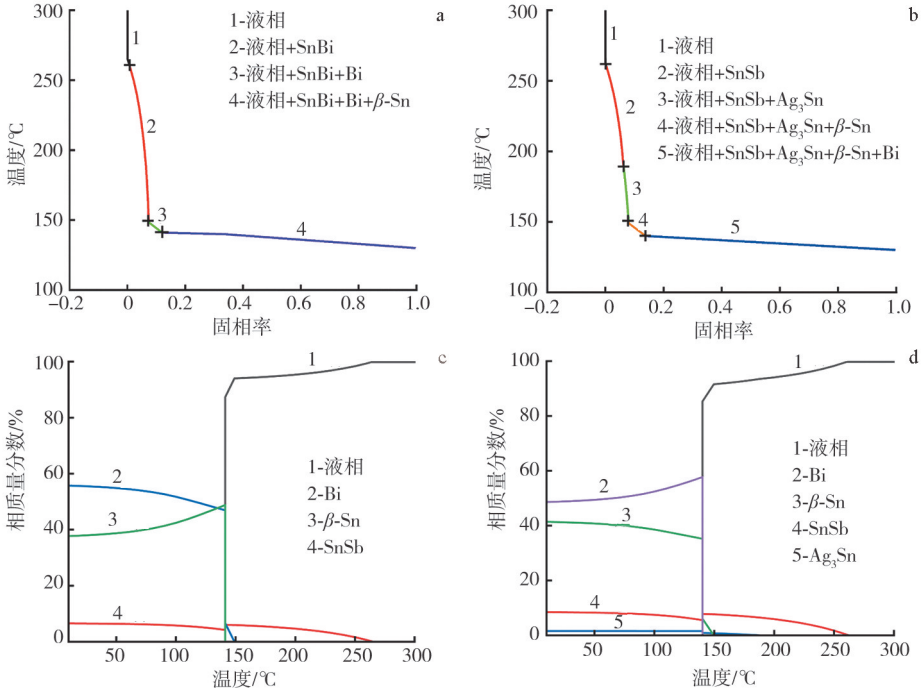
Tab.1　Melting points, melting ranges and latent heats of fusion for SnBi58Sb3Agx (x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) fusible alloys

样品	熔点/℃	熔程/℃	熔化潜热/(J·g^{-1})
SnBi58Sb3	138.6	5.8	43.7
SnBi58Sb3Ag0.2	138.8	4.9	42.6
SnBi58Sb3Ag0.4	139.6	4.9	39.2
SnBi58Sb3Ag0.6	138.1	5.3	37.8
SnBi58Sb3Ag0.8	142.3	3.6	34.3

2.5　合金相变理论分析

合金凝固过程中的析出相形貌对材料性能具有显著影响.通常，粗大的析出相会导致合金性能下降，而细小且均匀分布的析出相则能有效提升合金性能.因此，研究合金凝固过程中的析出特征具有重要意义.合金凝固过程通常发生在较快的冷却速率下，属于非平衡凝固.采用 Scheil 非平衡凝固模型，可有效计算合金

的冷却凝固曲线.图 6a、b 分别为 SnBi58Sb3 基体合金和 SnBi58Sb3Ag0.8 改性合金的冷却凝固曲线.此外,通过单轴平衡方法计算得到合金的凝固析晶特征,图 6c、d 分别为 SnBi58Sb3 基体合金和 SnBi58Sb3Ag0.8 改性合金的凝固析晶曲线.对比 SnBi58Sb3 和 SnBi58Sb3Ag0.8 的凝固析出过程可知,加入的 Ag 元素可在合金体系中生成 Ag_3Sn 金属间化合物,且 Ag_3Sn 相较 Bi 相优先析出,可作为 Bi 相的异质形核核心,细化 Bi 相晶粒.同时,Ag 元素的加入也可细化 SnSb 相,与图 3 所示的实际微观结构分析结果一致,证实了 Ag 元素的晶粒细化作用.对比图 6c、d 可知,Ag 改性合金中的 Sn 元素相对含量增加,而 Bi 元素相对含量下降.这是由于 Ag 元素可能与 Sn 元素反应生成更稳定的 Ag_3Sn 金属间化合物,抑制了 Bi 相的析出,导致合金中 Bi 元素含量降低.结合 XRD 测试结果可知,随着 Ag 含量的增加,Bi 相衍射峰强度降低,而 Bi 含量的降低可减小合金的脆性,提高合金的塑性.以上结果表明,Ag 元素的加入整体上提高了 SnBi58Sb3 合金的塑性,理论模拟计算结果与实际测试结果一致,可为合金凝固过程的分析提供可靠的理论指导.具体而言,SnBi58Sb3Ag0.8 改性合金的冷却凝固过程可分为 5 个主要阶段:1) 在高温区间内,合金处于完全液相状态,无固相析出;2) 温度降至 262 ℃时,SnSb 相开始析出,此时液相与 SnSb 相两相共存;3) 温度降至 188 ℃时,Ag_3Sn 相开始析出,液相、SnSb 相和 Ag_3Sn 相三相共存;4) 温度降至 149 ℃时,β-Sn 相开始析出;5) 温度降至 140 ℃时,体系发生 L→β-Sn+Bi+Ag_3Sn 共晶反应,直至液相消失,最终形成 β-Sn、Bi、SnSb、Ag_3Sn 四相共存.



a.SnBi58Sb3 冷却凝固曲线;b.SnBi58Sb3Ag0.8 冷却凝固曲线;c.SnBi58Sb3 凝固析晶曲线;d.SnBi58Sb3Ag0.8 凝固析晶曲线.

图 6　SnBi58Sb3 和 SnBi58Sb3Ag0.8 易熔合金的冷却凝固曲线及凝固析晶曲线

Fig.6　Cooling solidification curves and solidification crystallization curves of SnBi58Sb3 and SnBi58Sb3Ag0.8 fusible alloys

3　结　论

通过添加不同质量分数的 Ag 元素对 SnBi58Sb3 基体合金进行改性.XRD 分析表明,随着 Ag 含量的增加,合金中 Bi 相的衍射峰强度逐渐减弱,表明 Ag 元素的加入可有效细化晶粒,并抑制脆性 Bi 相的析出.金相显微镜图像显示,引入 Ag 元素后,脆硬的条状富 Bi 相得到细化,且分布更加均匀,当 Ag 含量达到 0.2% 时,组织的细化程度和均匀性达到最佳状态.Ag 元素的添加有效促进了晶粒细化,晶粒尺寸的减小增强了对位错运动的阻碍作用,增加的滑移面数量有助于应力释放,从而提高了合金的断后伸长率.SnBi58Sb3Ag0.2 改性合金展现出最佳的力学性能,其抗拉强度达到 81.13 MPa,断后伸长率为 16%.然而,随着 Ag 含量的进一步增加,细化效果减弱,第二相强化效应开始主导,导致断后伸长率下降.此外,Ag 元素添加对合金熔点影响较小,呈轻微波动特征,而熔程和熔化潜热降低,仍能满足易熔合金的实际使用要求.

参考文献：

[1] Zhou K Y, Tang Z Y, Lu Y P, et al. Composition, microstructure, phase constitution and fundamental physicochemical properties of low-melting-point multi-component eutectic alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(2): 131-154. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.08.022.

[2] Ge H S, Li H Y, Mei S F, et al. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: an emerging frontier in energy area[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 331-346. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.008.

[3] 陈平，王兆军，凌一鸣. 自动喷水灭火装置中易熔合金型感温器件的研究[J]. 电子器件，2008，31(4)：1381-1383.
Chen Ping, Wang Zhaojun, Ling Yiming. Study on temperature-sensing device of automatic sprinkler head for fire protection[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31(4): 1381-1383.

[4] 林琦，杨立军. 浅谈易熔塞在液化气体罐车使用中的重要性[J]. 化工管理，2017(29)：265.
Lin Qi, Yang Lijun. Discussion on the importance of fusible plug in the use of liquefied gas tanker[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(29): 265.

[5] 张强，赵笑寒，王乃民. 火焰探头与易熔塞在火灾探测中的综合应用设计[J]. 工业仪表与自动化装置，2017(5)：52-55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0682.2017.05.013.
Zhang Qiang, Zhao Xiaohan, Wang Naimin. Integrated application design of the flame probes and fusible plug in fire detection[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(5): 52-55.

[6] Zhang C, Liu S D, Qian G T, et al. Effect of Sb content on properties of Sn-Bi solders[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1): 184-191. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63046-6.

[7] Singh V, Pathote D, Jaiswal D, et al. Measurement of mixing enthalpies for Sn-Bi-Sb lead-free solder system[J]. Journal of Electronic Materials, 2023, 52(9): 6316-6334. DOI: 10.1007/s11664-023-10579-4.

[8] 杨添淇，赵修臣，程荆卫，等. Cu 和 Sb 元素添加对 Sn-Bi 共晶合金性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2021，50(2)：621-626.
Yang Tianqi, Zhao Xiuchen, Cheng Jingwei, et al. Effects of Cu and Sb addition on properties of Sn-Bi eutectic alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(2): 621-626.

[9] El Basaty A B, Deghady A M, Eid E A. Influence of small addition of antimony(Sb) on thermal behavior, microstructural and tensile properties of Sn-9.0Zn-0.5Al Pb-free solder alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 245-253. DOI: 10.1016/j.msea.2017.06.092.

[10] El-Daly A A, Hammad A E, Al-Ganainy G A, et al. Enhancing mechanical response of hypoeutectic Sn-6.5Zn solder alloy using Ni and Sb additions[J]. Materials & Design(1980-2015), 2013, 52: 966-973. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.023.

[11] Sun H Y, Li Q Q, Chan Y C. A study of Ag additive methods by comparing mechanical properties between Sn57.6Bi0.4Ag and 0.4wt% nano-Ag-doped Sn58Bi BGA solder joints[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(10): 4380-4390. DOI: 10.1007/s10854-014-2177-7.

[12] 吴文云，邱小明，殷世强，等. Bi、Ag 对 Sn-Zn 无铅钎料性能与组织的影响[J]. 中国有色金属学报，2006，16(1)：158-163. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2006.01.026.
Wu Wenyun, Qiu Xiaoming, Yin Shiqiang, et al. Influence of Bi, Ag on microstructure and properties of Sn-Zn lead-free solder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(1): 158-163.

[13] Yang T Q, Zhao X C, Xiong Z S, et al. Improvement of microstructure and tensile properties of Sn-Bi-Ag alloy by heterogeneous nucleation of β-Sn on Ag_3Sn[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 785: 139372. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139372.

[14] Yang L, Zhu L, Zhang Y C, et al. Microstructure, IMCs layer and reliability of Sn-58Bi solder joint reinforced by Mo nanoparticles during thermal cycling[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 280-291. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.012.

[15] 朱文嘉，赵中梅，龙登成，等. SnBi36Ag0.5Sbx 焊料合金组织与性能[J]. 有色金属科学与工程，2023，14(4)：536-542. DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2023.04.012.
Zhu Wenjia, Zhao Zhongmei, Long Dengcheng, et al. Study on microstructure and properties of SnBi36Ag0.5Sbx solder alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(4): 536-542.

(责任编辑　张　会)