

Zn对Sn-11Sb-6Cu轴承合金组织与力学性能的影响

林家祥¹ 杨文汇¹ 晋宇鑫¹ 闫共芹¹ 梁宏麓¹ 蓝春波¹ 王莉莉²

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 柳州 545616; 2. 柳州华锡有色设计研究院有限责任公司, 柳州 545616)

摘要 通过显微组织观察、物相分析、硬度测试和拉伸试验等方法研究了Zn含量对Sn-11Sb-6Cu合金组织和力学性能的影响。结果表明,随Zn含量提高,合金中SnSb相的晶粒尺寸呈先减小后增大的变化趋势,添加Zn的试样晶粒尺寸均小于未添加Zn的试样。此外,Zn的添加使合金基体硬度有所提高,且抗拉强度与SnSb相晶粒尺寸成反比。过量的Zn会导致脆性析出相增多,从而降低合金塑性。添加1.5%的Zn时,SnSb相晶粒尺寸最小,合金的抗拉强度达到最大值,同时塑性保持在合理范围内,表现出较好的综合力学性能。

关键词 Zn; Sn基合金; Sn-11Sb-6Cu; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.1⁺⁴

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240476

Effects of Zn on Microstructure and Mechanical Properties of Bearing Sn-11Sb-6Cu Alloy

LIN Jiaxiang¹, YANG Wenhui¹, JIN Yuxin¹, YAN Gongqin¹, LIANG Hongchi¹, LAN Chunbo¹, WANG Lili²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545616; 2. Liuzhou Huaxi Design & Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Liuzhou 545616)

Abstract: The effects of different Zn contents on microstructure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu alloy were investigated through microstructural observations, phase analysis, hardness testing, and tensile testing. The results reveal that the grain size of SnSb phase is initially decreased and then increased with increasing Zn content. However, the grain size of Zn-contained specimens remains smaller than that of ones without Zn addition. Additionally, Zn addition enhances hardness of the matrix, while the variation in tensile strength exhibits an inverse correlation with the grain size of SnSb phase. Furthermore, excessive Zn promotes the precipitation of brittle phases, leading to a gradual reduction in ductility. With 1.5% Zn addition, the grain size of SnSb phase reaches the minimum value, where desirable tensile strength is achieved, and ductility is maintained within a reasonable range, indicating satisfied comprehensive mechanical properties.

Key Words: Zn, Sn-based Alloys, Sn-11Sb-6Cu, Microstructure, Mechanical Properties

Sn基轴承合金因其优异的摩擦学性能和自润滑特性,被广泛应用于汽车、航空航天及重型机械等领域^[1-2],其具有良好的耐磨性、耐腐蚀性、嵌藏性、顺应性和抗咬合性,能够在较高负荷和温度条件下维持稳定的服役性能^[3]。然而,随着工业对更高性能、更低能耗和更环保材料的需求日益增长,Sn基轴承合金在承载能力、耐热性和抗疲劳性能等方面仍有进一步提升的空间,尤其是在高负荷、高温工作环境下^[4]。

采用材料改性或加工工艺优化等方式可以优化其综合性能,满足更高的应用需求,其中添加合金元素以

优化Sn基轴承合金的微观组织结构和综合力学性能是一种常见且有效的途径^[5-8]。该类合金的成分包含3%~8%的Cu、5%~12%的Sb和80%~90%的Sn,显微组织主要由Sn基体、SnSb相和Cu₆Sn₅相组成,其形态和分布对合金的硬度、疲劳强度、延展性及摩擦学行为具有重要影响。研究发现,具有差异化SnSb相晶粒尺寸分布的Sn基合金,其显微硬度明显高于单一粗晶粒或细晶粒的试样^[9],通过调控SnSb相的微观结构可改善合金的力学性能和摩擦学性能^[10]。此外,短棒状形貌的Cu₆Sn₅相可以使合金在润滑条件下表现出最

收稿日期:2024-11-17;修订日期:2025-03-07

基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升资助项目(2022KY0350);广西汽车零部件与整车技术重点实验室自主课题资助项目(2023GKLACVTKF03);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2024503);柳州市科技计划资助项目(2024AA0203A001)

第一作者简介:林家祥,男,1969年出生,教授,E-mail:acxdx06@163.com

通信作者:蓝春波,男,1985年出生,博士,E-mail:anchunbo@126.com;王莉莉,女,1992年出生,工程师,E-mail:1443395219@qq.com

引用格式:林家祥,杨文汇,晋宇鑫,等. Zn对Sn-11Sb-6Cu轴承合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(11):1734-1739.

LIN J X, YANG W H, JIN Y X, et al. Effects of Zn on microstructure and mechanical properties of bearing Sn-11Sb-6Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1734-1739.

高的显微硬度和最低的磨损率^[11]。

为改善Sn基轴承合金的性能,通常添加少量合金元素如Ni、As、Ag、Zn、Ti、Co等进行合金化^[12]。研究表明,不同元素的添加能有效细化合金晶粒并优化显微组织,进而提高其力学性能。DONG Q等^[13]研究了添加Ag对Sn-11Sb-6Cu巴氏合金组织和力学性能的影响,发现添加Ag后形成了新的金属间化合物Ag₃Sn,显著提高了合金的硬度、强度和塑性,且当Ag添加量为1.0%时性能最佳。NI Y Q等^[14]研究了添加La和热处理对Sn基巴氏合金的影响。结果表明,改性后的合金组织更加均匀,SnSb立方相得到明显细化和钝化,显微硬度(HV)由24.67提高到37.84,同时润湿性得到改善。LASHIN A R等^[15]研究了向Sn-10Sb-2Cu合金中添加不同含量的Zn,发现加Zn后合金的结构、电阻率、硬度、弹性模量和粗糙度等物理特性受到显著影响。TASGIN Y^[16]研究了在Sn-Sb-Cu合金涂层材料中分别添加质量分数为10%的MgO、Al₂O₃和FeCr₂O₄对材料耐磨性的影响。

尽管已有研究探讨了不同合金元素(如Ag、Pb等)对Sn-Sb-Cu合金体系的影响,即通过优化合金的显微组织结构来提升力学性能,但Zn对Sn-11Sb-6Cu轴承合金的影响的报道很少,且Zn的最优添加量仍存在争议,同时其在合金中的合理添加范围研究不够彻底。因此,本研究在此基础上,采用常规铸造技术制备目标合金,通过金相分析、物相分析、硬度测试和拉伸试验等方法,研究Zn含量(0.5%、1%、1.5%和2%,质量分数,下同)对Sn-11Sb-6Cu轴承合金组织和力学性能的影响,旨在为高性能Sn基轴承合金的制备提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料名义成分为Sn-11Sb-6Cu,其化学成分见表1。采用质量分数高于99.9%的Zn作为添加元素,将Sn-11Sb-6Cu合金放至SG2-3-12型井式坩埚电阻炉中加热熔化,待合金完全熔化后,分别加入质量分数为0%、0.5%、1.0%、1.5%和2.0%的Zn粒,并在480℃下保温0.5 h。为使合金熔液均匀混合,使用石墨棒对其搅拌约3 min,随后加入0.02%的NH₄Cl去除杂质。合金液以460℃的浇注温度浇注到已加热至120℃的石墨型中,得到质量约为300 g、尺寸约为70 mm×20 mm×20 mm的铸件,测试试样均从铸件中部区域取样,以保证试验数据的可比性和一致性。

使用DK7745型数控线切割机将各组合金切割制备成不同的试样。金相试样(8 mm×6 mm×6 mm)经机械研磨和抛光后,使用体积分数为4%的硝酸酒精溶液腐蚀5~8 s,并用DMI3000M型光学显微镜(OM)观

察其显微组织。物相分析试样(6 mm×5 mm×5 mm)经抛光处理后,使用SmartLab SE型X射线衍射仪(XRD)分析其物相组成,扫描角度为20°~90°,扫描速率为4(°)/min。使用Sigma 04-55型扫描电镜(SEM)观察部分试样,并结合其附件X射线能量色散谱仪(EDS)进行微区成分分析。硬度测试采用HVS-1000Z型维氏硬度计,载荷为0.245 N,保持时间为10 s,每个试样在不同位置测试5次,取平均值。采用ETM105D型伺服液压材料试验机测试试样的力学性能,加载速率为5 mm/min,每组试样进行3次试验,结果取平均值,拉伸试样尺寸见图1。用Sigma 04-55型SEM对部分拉伸样的断口形貌进行观察分析。

表1 Sn-11Sb-6Cu合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Sn-11Sb-6Cu alloy %

w_B					
Sb	Cu	Pb	As	Fe	Cr
11.83	6.04	0.48	0.02	0.012	0.013
					余量

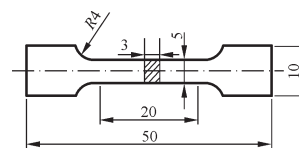


图1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织

孙旭茂^[17]发现Sn-11Sb-6Cu的金相组织由黑色的 α 相Sn基固溶体(软基体)、白色的较大方形或不规则多边形的 β 相SnSb(硬质相)以及白色的针状或星状 η 相Cu₆Sn₅(硬质相)组成。在冷却结晶过程中,Cu₆Sn₅组织首先从液相中析出,形成骨架状结构,并作为SnSb相的异质形核核心,这种骨架状的Cu₆Sn₅相有助于防止后续析出密度较小的SnSb相上浮,避免宏观偏析^[18-19]。Sn-11Sb-6Cu- x Zn合金的金相组织见图2。可以看出,Zn加入后Sn基体相对含量保持稳定,SnSb和Cu₆Sn₅相的分布仍较均匀,同时SnSb相的晶粒尺寸整体均有不同程度的减小,表现出较明显的晶粒细化现象。此外,本研究制备的Sn-11Sb-6Cu试样的金相组织(图2b)与典型的Sn-11Sb-6Cu合金(图2a)相比有明显不同,虽然二者的合金成分相同,但由于铸造工艺、冷却速率、取样位置及金相分析方法等可能存在差异,因此SnSb相的形貌、分布和尺寸明显不同。

采用Image J软件对Sn-11Sb-6Cu- x Zn中SnSb数量和对角线长度进行了统计,结果见表2。可以看出,

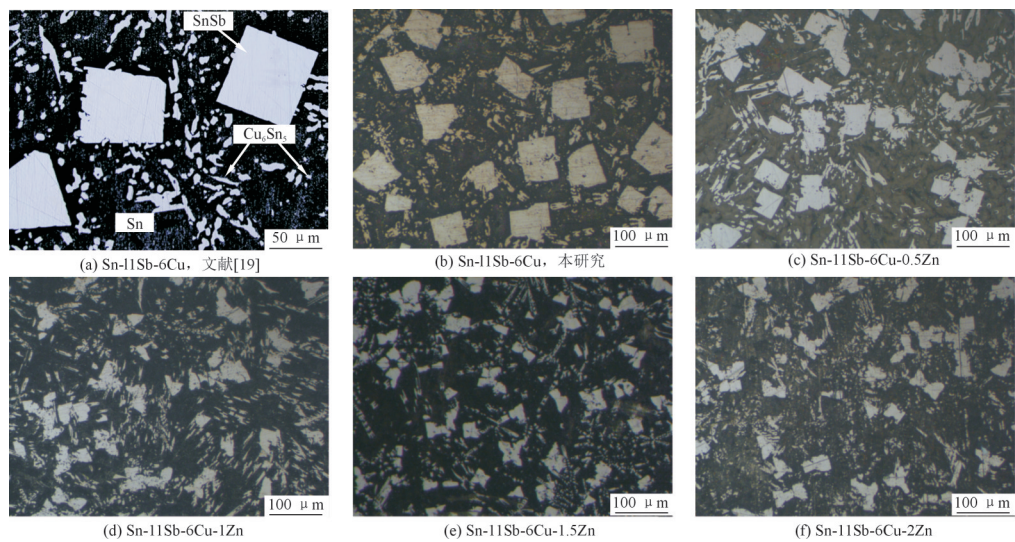


图2 Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn合金的金相组织

Fig.2 OM images of Sn11Sb6Cu-*x*Zn alloy

表2 Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn合金中SnSb数量和对角线长度
Tab.2 Quantities and diagonal length of SnSb phases in Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn alloy

<i>w</i> (Zn) / %	SnSb数量	对角线长度/μm	平均值/μm
0	16	54.4~109.8	86.9
0.5	31	31.1~79.5	55.4
1.0	44	26.2~37.7	38.5
1.5	45	20.5~55.0	33.3
2.0	46	25.6~64.4	39.6

添加Zn后合金中SnSb相的数量明显增加,且晶粒尺寸随Zn添加量的增加呈先减小后增大的趋势,当Zn的添加量为1.5%时,晶粒尺寸最小,约为33.3 μm,添加Zn

的试样晶粒尺寸均小于未添加Zn元素的试样。可以认为,在Sn-11Sb-6Cu合金中添加适量的Zn能抑制SnSb相生长,起到细化晶粒的作用。Zn的添加对Sn-11Sb-6Cu合金的晶粒尺寸具有显著影响,这与Zn在合金中的扩散及晶界偏聚行为密切相关。现有研究表明,Zn在Sn基体中的扩散速率相较于Sb和Cu更高^[20],且在冷却过程中Zn易偏聚于晶界,改变晶界的化学组成,从而抑制晶粒的长大^[21]。此外,随着Zn添加量的提高,富余的Zn可以作为SnSb相结晶时的异质形核核心,增加该相形核点的数量,从而加速晶粒的细化^[22]。

图3为Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn合金试样的XRD结果。

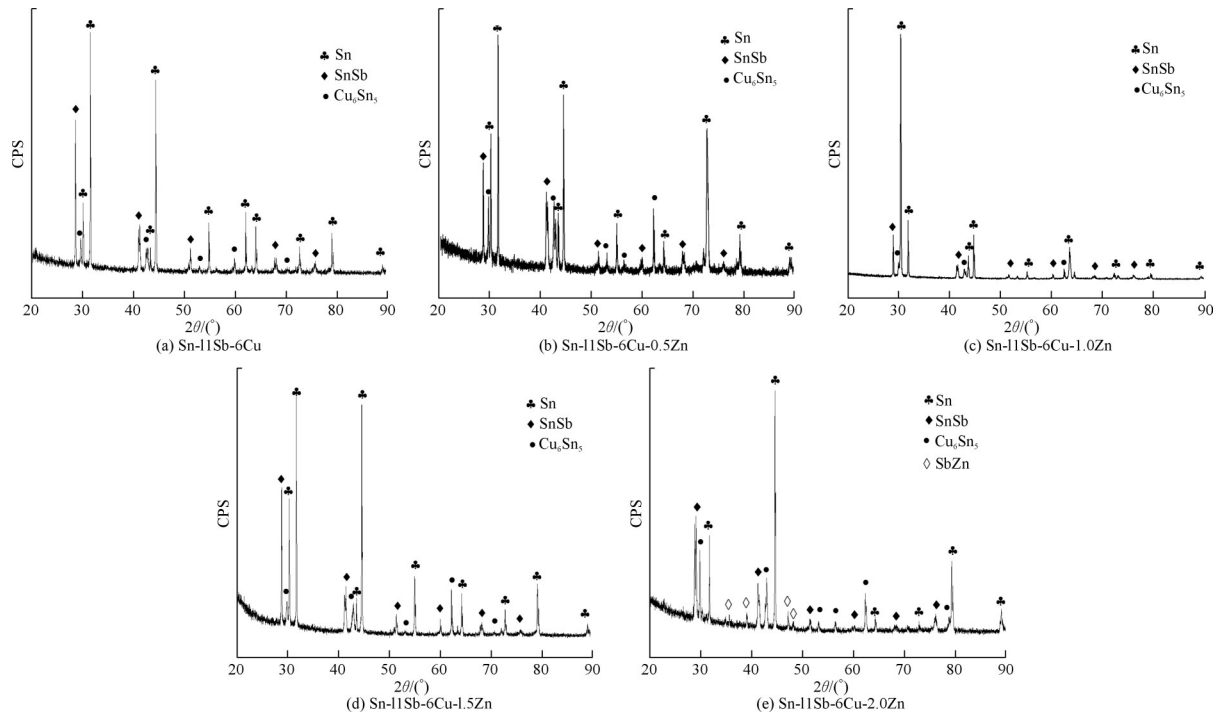


图3 Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn合金的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of Sn-11Sb-6Cu-*x*Zn alloy

可以发现,添加 Zn 后,仅在 Sn-11Sb-6Cu-2Zn 试样中检测到了较明显的新衍射峰,通过物相定性分析发现,该衍射峰对应的物相可能为 Zn 与 Sb 形成的金属间化合物(SbZn 相),而其他 3 组试样中未检测到明显的新衍射峰。这一现象主要是 Zn 在合金中的固溶和扩散行为所致。当 Zn 含量较低(0.2%~0.39%)时,Zn 主要以固溶的形式存在。Zn 可以少量固溶于 Sn 基体中形成 β -Sn 相,此外 Zn 还能够置换 Cu_6Sn_5 相中的部分 Sn 原子,生成置换固溶体 $\text{Cu}_6(\text{Zn}_{0.5}\text{Sn}_{4.5})^{[23-24]}$,因此 Zn 添加量较低($<1\%$)时,未观察到显著的新物相。当 Zn 的添加量进一步增加($<1.5\%$),部分多余的 Zn 开始向晶界扩散,并在晶界处聚集,仅有极少量 Zn 与其他金属反应生成新相^[21,25]。当 Zn 含量为 2% 时,Zn 在晶界的富集和反应显著增强,生成了更多的金属间化合物(见图 2f),推测这些新物相导致了 XRD 中出现新的衍射峰^[26]。

图 4 为 Sn-11Sb-6Cu 和 Sn-11Sb-6Cu-2Zn 的 SEM 形貌及微区成分分析。可以看出,两组试样的主要组成均为 Sn、Sb、Cu 3 种元素。此外还发现,添加 2% 的 Zn 后 Cu 在低能区($L\alpha$ 峰)的峰强度有所提高,这可能是由于在 EDS 能谱中 Zn 和 Cu 的特征峰在低能区接近从而使二者部分峰重叠,同时也与 Zn 加入后使 Cu 重新分布、析出相变化或基体效应相关。因此仅根据 Cu 峰在低能区的变化难以直接判断 Zn 含量的变化。

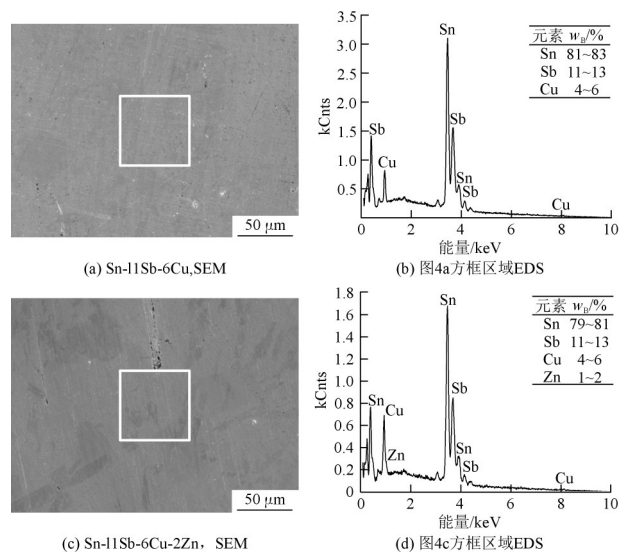


图 4 Sn-11Sb-6Cu 和 Sn-11Sb-6Cu-2Zn 合金的 SEM 形貌和 EDS 能谱图

Fig.4 SEM images and EDS results of Sn-11Sb-6Cu and Sn-11Sb-6Cu-2Zn alloys

2.2 力学性能

由于 Cu_6Sn_5 相的尺寸较小且分布不均,未对其硬度进行单独测量,因此本研究只测量各组合金试样中的 Sn 基体和 SnSb 相的显微硬度。表 3 为 Sn-11Sb-

6Cu- x Zn 合金的显微维氏硬度。可以看出,添加 Zn 后 Sn 基体的显微硬度(HV)从 19.6 提高至 20.9~22.3,而 SnSb 相硬度(HV)基本不变,约为 60,这归因于 Zn 在 Sn 基体中的固溶作用。Zn 原子溶解到基体中会引起晶格的微小畸变,从而阻碍位错的滑移,使 Sn 基体硬度有所提高。由于 Zn 不溶于 SnSb 相,因此对其硬度基本没有影响。

表 3 Sn-11Sb-6Cu- x Zn 合金的维氏显微硬度(HV)

Tab.3 Vickers microhardness of Sn-11Sb-6Cu- x Zn alloy

$w(\text{Zn})/\%$	基体硬度	SbSn 相硬度
0	19.6 ± 0.3	60.1 ± 1.2
0.5	21.1 ± 0.3	59.4 ± 0.9
1.0	22.3 ± 0.4	61.2 ± 1.6
1.5	20.9 ± 0.3	60.3 ± 2.1
2.0	21.6 ± 0.2	60.5 ± 1.7

图 5 为 Sn-11Sb-6Cu- x Zn 合金的力学性能。可以看出,合金的抗拉强度随 Zn 添加量的增加呈先增大后减小的趋势,添加 1.5% 的 Zn 时,合金抗拉强度达到最大值,比未添加 Zn 的合金提高了约 23%。少量 Zn 虽然能够提高合金的抗拉强度,但会使其塑性降低,表现为伸长率随 Zn 添加量的增加而逐渐降低,从 3.6% 降至 2.5%。Zn 对抗拉强度的提升归因于其对晶粒的细化作用。较小的晶粒尺寸通常带来更高的强度,这是因为晶界有效阻碍了位错的运动。当 Zn 的添加量为 1.5% 时,SnSb 相的晶粒尺寸最小,从而增强了合金的抗拉强度。当 Zn 进一步增加时,晶粒重新粗化,并且脆性相的析出(如 Zn-Sb 化合物)导致强度降低,尤其是在其添加量为 2% 时,脆性相在晶界的析出和应力集中显著降低了合金的塑性。这表明只有适量添加 Zn 时,合金才能实现最佳的力学性能。

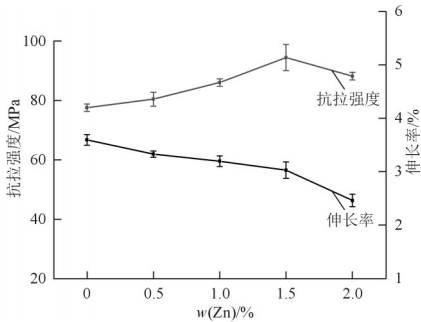


图 5 Sn-11Sb-6Cu- x Zn 合金的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu- x Zn alloy

图 6 为 Sn-11Sb-6Cu-1.5Zn 和 Sn-11Sb-6Cu-2Zn 试样的断口 SEM 形貌。可以看出,两组试样的断裂面均具有一定的解理断裂特征,但断裂形貌仍存在一定差异。在图 6a 中,Sn-11Sb-6Cu-1.5Zn 试样的断裂表面以光滑的解理面为主,但局部区域仍可见少量不规则

的凹凸结构和韧窝形貌。这表明在其解理断裂的同时,局部区域可能发生了微观空洞的扩展与合并,使得材料在一定程度上表现出韧性断裂特征。相比之下,图 6b 中的 Sn-11Sb-6Cu-2Zn 试样的断裂表面主要由较连续的解理面构成,并且可见明显的棱角特征,裂纹扩展主要沿晶界或解理面进行,且该试样的断裂表面几乎未见明显的塑性变形区域,表明材料的断裂方式以脆性解理断裂为主。可以认为,当 Zn 含量增加至 2.0% 时,合金的塑性有所降低,其在外力作用下更易发生脆性断裂。

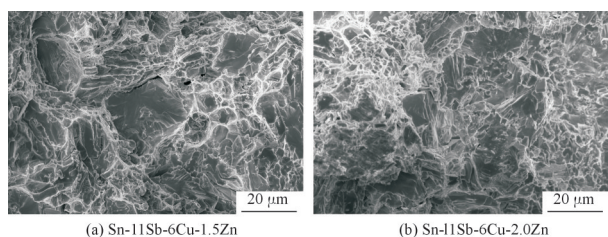


图 6 Sn-11Sb-6Cu-1.5Zn 和 Sn-11Sb-6Cu-2.0Zn 合金的拉伸断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of Sn-11Sb-6Cu-1.5Zn and Sn-11Sb-6Cu-2.0Zn alloys

3 分析与讨论

固溶强化是提升 Sn-11Sb-6Cu 合金硬度和强度的重要机制之一。适量添加 Zn 后,部分 Zn 原子可以溶解到 Sn 基体中,与 Sn 原子形成置换固溶体,这一过程会引起基体晶格产生一定的畸变,进而阻碍位错的滑移,提高了合金的强度和硬度^[24-25]。此外,Zn 还能够与 Cu₆Sn₅等硬质相发生的原子置换,使这些相的局部化学组成发生变化,进一步提高其弹性模量和硬度等^[23]。当 Zn 含量超过一定阈值时,部分 Zn 会与 Sb 反应形成 SbSn 相等金属间化合物^[26]。其虽然在一定程度上提高了材料的硬度,但由于本质上属于脆性相,因此会降低合金的塑性。

Zn 的加入还会对合金的晶界特征产生显著影响。低含量 Zn(如 0.5%~1.5%)主要以固溶形式存在,同时部分 Zn 原子会扩散并偏聚在晶界区域,这种现象能够起到“钉扎”作用,从而抑制晶粒的生长,提高合金的强度和稳定性^[21]。当 Zn 的添加量较高(超过 2%)时,Zn 在晶界的富集可能引发局部应力集中,并促进脆性相的形成,这些金属间化合物通常表现出较高的硬度和脆性,削弱晶界的抗裂纹扩展能力,使裂纹更容易沿晶界扩展。最终这种微观组织的变化会导致材料的抗拉强度和塑性显著下降,表现出明显的脆性断裂倾向。

在金属材料中,晶粒越细小通常会使得强度越高,这

是因为晶界能够有效阻碍位错的运动。本研究中,当 Zn 的添加量为 1.5% 时,SnSb 相的晶粒尺寸达到最小值,合金的抗拉强度也达到最大,而 Zn 添加量进一步增加至 2% 时,过量 Zn 的引入导致脆性相的析出增多,同时伴随 SnSb 相晶粒的轻微粗化和组织均匀性降低,尽管脆性相硬度较高,但其在晶界处的富集引发应力集中,削弱了晶界对裂纹扩展的抵抗能力,最终导致合金抗拉强度和韧性显著下降。因此 Zn 的添加量需要在 1.5% 附近进行优化,以平衡晶粒细化效果与脆性相析出的负面影响,避免材料过度脆化。

4 结 论

(1) Zn 的添加显著影响了 Sn-11Sb-6Cu 合金的金相组织,尤其是 SnSb 相晶粒尺寸。与未改性合金相比,添加适量的 Zn 能够使 SnSb 相的晶粒尺寸减小,从而显著地细化该合金的微观组织。

(2) Zn 在 Sn-11Sb-6Cu 轴承合金中会形成固溶体,同时与其他元素作用形成金属间化合物,使合金的硬度和抗拉强度提高,但牺牲了材料的塑性。当 Zn 的添加量较多时,该元素倾向于晶界处富集并析出脆性相,导致合金发生脆性断裂使材料的强度和塑性下降,使其工程应用价值下降。

(3) Zn 元素的添加量在 0~1.5% 之间时,能够显著细化合金的晶粒尺寸、提高抗拉强度,并在保持塑性合理范围的同时实现较优的综合力学性能,表明此条件下的 Sn-11Sb-6Cu 合金具有优良的结构和性能。

参 考 文 献

- [1] 秦卓,赵子文,魏海东,等.巴氏合金的研究进展及制备技术[J].热加工工艺,2016,45(18):10-14.
- [2] 尹延国,焦明华,解挺,等.滑动轴承材料的研究进展[J].润滑与密封,2006(5):183-187.
- [3] ZEREN A. Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding[J]. Materials & Design, 2007, 28(8): 2 344-2 350.
- [4] 刘晓芳,钟素娟,荆文,等. Sn 基巴氏合金制备工艺与成分优化改性研究进展[J].焊接,2023(2):44-52.
- [5] HAEDICKE L, MERGEN R, KARI A, et al. Improved tin based bearing alloy for low emission two-stroke engines [C]//ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Vancouver, BC, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [6] MOAZAMI G M, JENABALI J S A, NAZARBOLAND A. Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material[J]. Materials & Design, 2009, 30(6): 2 283-2 288.
- [7] REN X Y, CHEN N N, ZHANG G W, et al. Effect of Pb on microstructure and mechanical properties of Tin Babbitt alloy [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2 478(5): 052 007.
- [8] EL-BEDIWI A B. Effects of micro-additions on structures and prop-

- erties of rapidly solidified Sn-10Sb alloy[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2003, 158(7): 475-479.
- [9] NI Y Q, GUO P, REN C G, et al. Differentiated SnSb grain size distribution for improved tribological properties of babbitt alloy[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2023, 75(5): 588-595.
- [10] VALEEVA A K, VALEEV I S, FAZLYAKHMETOV R F. Microstructure of the β -phase in the Sn-11Sb-5.5Cu babbitt[J]. Physics of Metals and Metallography, 2017, 118(1): 48-51.
- [11] NI Y Q, SUN N N, ZHU G X, et al. Effect of different Cu_6Sn_5 morphology on the tribological properties of Babbitt alloy[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2022, 74(5): 580-587.
- [12] EL-BEDIWI A, LASHIN A R, MOSSA M, et al. Indentation creep and mechanical properties of quaternary Sn - Sb based alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528 (10-11): 3 568-3 572.
- [13] DONG Q, YIN Z G, LI H L, et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu babbitt[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A722: 225-230.
- [14] NI Y Q, LI X, DONG G G, et al. The combined effect of La and heat treatment on the tribological performances of tin-Babbitt alloy[J]. Journal of Engineering Tribology, 2019, J233 (7): 1 117-1 126.
- [15] LASHIN A R, MOSSA M, EL-BEDIWI A, et al. Study of some physical properties of the rapidly solidified Sn-Sb-Cu-Zn alloys[J]. Materials & Design, 2013, 43: 322-326.
- [16] TASGIN Y. Effect of MgO , Al_2O_3 and FeCr_2O_4 on microstructure and wear resistance of Babbitt metal (Sn-Sb-Cu) [J]. Materials Research Express, 2019, 6(4): 046 548.
- [17] 孙旭茂. Sn基巴氏合金的金相组织和铸造缺陷[J]. 内燃机配件, 1992(3): 1-8.
- [18] CHEN S W, ZI A R, GIERLOTKA W, et al. Phase equilibria of Sn-Sb-Cu system[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132 (2-3): 703-715.
- [19] DONG Q. First-principles calculations of structural and elastic properties of Sn solid solution, Cu_6Sn_5 and SnSb in tin-based bearing alloy[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107 943.
- [20] HUANG F H, HUNTINGTON H B. Diffusion of Sb 124, Cd 109, Sn 113, and Zn 65 in tin[J]. Physical Review, 1974, B9(4): 1 479-1 488.
- [21] ABD EL-SALAM F, NADA R H, ABD EL-KHALEK A M. Effect of Cu additions on the structural and mechanical properties of Sn-Zn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A448(1-2): 171-176.
- [22] 朱路, 杨莉, 陈慧明, 等. 微量Zn颗粒对Sn-0.7Cu-xZn钎料焊点组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(23): 30-34.
- [23] CHEN S X, ZHOU W, WU P. Effect of Zn additions on the mechanical properties of Cu_6Sn_5 -Based IMCs: Theoretical and experimental investigations [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(10): 3 920-3 926.
- [24] MOSER Z, DUTKIEWICZ J, GASIOR W, et al. The Sn-Zn (tin-zinc) system[J]. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1985, 6 (4): 330-334.
- [25] SONG Z Y, JIN S C, SHEN Y M, et al. Indentation creep behaviors of SnSb_8Cu_4 Babbitt alloy with Zn and Cu addition [J]. Materials Transactions, 2022, 63(4): 579-585.
- [26] OKAMOTO H. Sb-Zn (Antimony-Zinc) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2008, 29(3): 290.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

