

超声启振温度对半固态 SnSbCu11-6 合金组织和性能影响

王 蕾¹ 李永坤¹ 周荣锋¹ 彭金志² 贾元伟² 卢红波² 罗晓斌² 张 浩¹ 李 尧¹ 霍定东¹

(1. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093; 2. 云南锡业新材料有限公司, 昆明 650093)

摘 要 采用超声振动技术制备 SnSbCu11-6 合金半固态坯料, 研究超声启振温度对半固态 SnSbCu11-6 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, 在超声振动引起的空化效应和声流效应下, 合金 SnSb 相尺寸显著细化。随超声启振温度升高, SnSb 相尺寸先减小后增大, 合金力学性能则呈先增后降的趋势。当超声启振温度为 380 °C 时, 合金综合性能最佳, 此时 SnSb 相平均晶粒尺寸为 $(48.3 \pm 8.2) \mu\text{m}$, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 70.25 MPa、60.61 MPa 和 4.86%, 较未超声处理时分别提高了 5.9%、4.6% 和 111.3%。

关键词 半固态; SnSbCu11-6 合金; 超声振动; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG249.2⁺6; TG146.1⁺1

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240487

Effects of Oscillation Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Semi-solid SnSbCu11-6 Alloy

WANG Lei¹, LI Yongkun¹, ZHOU Rongfeng¹, PENG Jinzhi², JIA Yuanwei², LU Hongbo², LUO Xiaobin², ZHANG Hao¹, LI Yao¹, HUO Dingdong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2. Yunnan Tin New Material Co., Ltd., Kunming 650093)

Abstract: The semi-solid billet of SnSbCu11-6 alloy was prepared by ultrasonic vibration treatment, and effect of ultrasonic oscillation temperature on microstructure and mechanical properties of SnSbCu11-6 alloy was investigated. The results indicate that the size of SnSb phase is significantly refined under the cavitation effect and acoustic effect caused by ultrasonic vibration treatment. The size of SnSb phase and mechanical properties of the alloy are increased firstly and then decreased with the increase of ultrasonic oscillation temperature. Optimal comprehensive properties are obtained at 380 °C, where the average grain size of SnSb phase is about $(48.3 \pm 8.2) \mu\text{m}$, and the tensile strength, yield strength and elongation reach up to 70.25 MPa, 60.61 MPa and 4.86%, which are increased by 5.9%, 4.6% and 111.3% compared with those of ones without ultrasonic treatment, respectively.

Key Words: Semi-solid, SnSbCu11-6 Alloy, Ultrasonic Vibration, Microstructure, Mechanical Properties

锡基巴氏合金具有优异的耐磨性和易结合性, 是 首选的轴瓦材料^[1], 其硬质相均匀地分布在软相基体

收稿日期: 2024-11-21; 修订日期: 2024-12-04

基金项目: 云南省科技厅科技计划资助项目(202301BC070001-009); 云南省科技厅人才和平台计划资助项目(202405AK34005); 2022 年云南省“兴滇英才支持计划”青年人才资助项目

第一作者简介: 王蕾, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, E-mail: 1300014796@qq.com

通信作者: 卢红波, 男, 1985 年出生, 高级工程师, E-mail: hblu0506@163.com

引用格式: 王蕾, 李永坤, 周荣锋, 等. 超声启振温度对半固态 SnSbCu11-6 合金组织和性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(11): 1 672-1 677.

WANG L, LI Y K, ZHOU R F, et al. Effects of oscillation temperature on microstructure and mechanical properties of semi-solid SnSbCu11-6 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1 672-1 677.

[16] HU T A, WANG S Q, ZHANG G Y, et al. Numerical simulations of sloshing flows with an elastic baffle using a SPH-SPIM coupled method[J]. Applied Ocean Research, 2019, 93: 101-105.

[17] LIU M B, ZHANG Z L. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for modeling fluid-structure interactions [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62(8): 984-701.

[18] LIU M B, SHAO J R, CHANG J Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydrodynamics [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 55(1): 244-254.

[19] XU R, STANSBY P, LAURENCE D. Accuracy and stability in incompressible SPH (ISPH) based on the projection method and a new approach [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(18): 6 703-6 725.

[20] 张勇佳, 周建新, 殷亚军, 等. GPU 加速的定向凝固枝晶生长的元胞自动机模型[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(6): 740-743.

[21] ZHUO Y H, ZHANG T, DU F, et al. A parallel particle swarm optimization algorithm based on GPU/CUDA [J]. Applied Soft Computing, 2023, 144: 110-499.

[22] SCHMID M, KLEIN F. Fluid flow in die cavities-experimental and numerical simulation [C]//International Die Casting Congress and Exposition. USA, Indianapolis, 1995.

[23] 强洪夫. 光滑粒子流体动力学新方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

(编辑: 张正贺)

中,软相基体使合金具有优异的顺应性、嵌入性和抗咬合性能,磨损后软基体向内凹,硬质点向外凸,在滑动面之间形成小间隙、储油空间和润滑剂通道,有助于减少滑动轴承中的摩擦^[2-3]。巴氏合金坯料通常采用液态浇注和离心铸造等传统制备方法,制备的零部件易存在成分偏析、SnSb相组织粗大、开裂、结合强度低和孔隙率的问题,制备的合金轴瓦只能应用于性能和结合强度要求不高的汽轮机等领域^[4]。

晶粒细化是提高材料力学性能和硬度的有效方法。目前研究主要集中在通过添加元素、径向剪切轧制或液态挤压等改性方法改善合金的服役性能^[5-7]。半固态成形技术自提出后,凭借组织细小致密、低成本、有效改善微观成分偏析等特点,受到广泛关注^[8-9]。半固态加工是一种介于固态成形和液态成形之间的近净成形工艺,具备固态成形和液态成形的优点,可以制备组织致密、晶粒细小的高性能零部件^[10]。超声振动技术是一种简单有效的晶粒细化方法,其原理是超声波能量施加到熔融合金中产生空化、声流和辐射压力等效应,均匀熔体的溶质场和局部过冷,从而实现熔体内爆发性形核,达到细化晶粒和提高组织分布均匀性的目的^[11]。ZHENG H T等^[12]利用超声处理技术制备了Sn-62Bi合金的半固态浆料,初生Bi相得到显著细化,合金的伸长率提高了129%。ZHAO J W等^[13]采用超声处理技术制备了过共晶Al-Si合金,硬度和抗拉强度都得到了提高。JIAN X G^[14]对AM60B镁合金进行超声处理后发现, α -Mg相形貌转变成近球状,等效尺寸细化至约40 μm 。但是,由于超声波能量会随着合金固相分数的增加而迅速衰减,超声处理技术主要用于细化合金的初生相,在SnSbCu11-6合金的凝固过程中,首先析出 η -Cu₆Sn₅相,然后析出的是 β -SnSb相。 β -SnSb相的析出温度比液相低近100 $^{\circ}\text{C}$,超声处理技术能否细化 β -SnSb相还需进一步探讨。

本研究拟采用超声处理技术制备SnSbCu11-6合金半固态浆料,揭示超声处理启振温度对合金显微组织和力学性能的影响,旨在为工业制备高性能的锡合金提供参考。

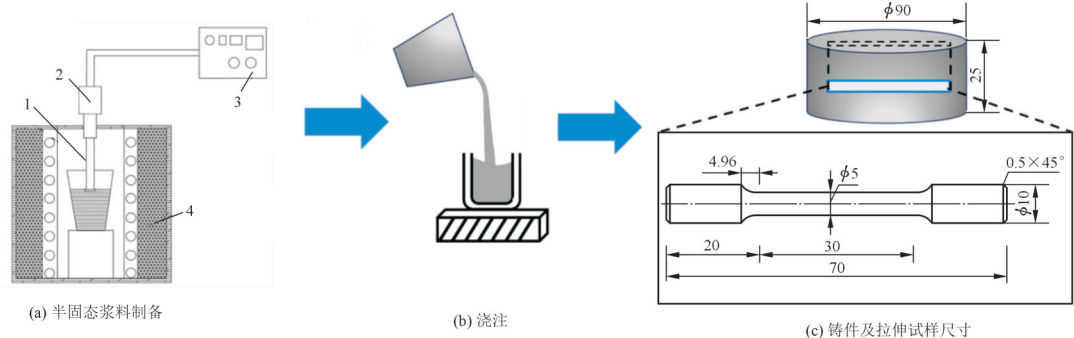


图2 SnSbCu11-6合金半固态制备流程示意图及试样尺寸示意图

Fig.2 Flow chart of semi-solid preparation for SnSbCu11-6 alloy and dimension of specimens

1. 超声变幅杆 2. 超声换能器 3. 超声发生器 4. 加热炉

1 试验材料和方法

试验材料为商用SnSbCu11-6合金,其成分见表1。通过差示扫描量热法(DSC,耐驰STA449F3同步热分析仪)测定凝固过程中液相线温度和固相线温度分别为376 $^{\circ}\text{C}$ 和223 $^{\circ}\text{C}$,见图1。

表1 SnSbCu11-6合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of SnSbCu11-6 alloy %			
w_B			
Sb	Cu	其他微量元素	Sn
10.77	6.05	0.17	余量

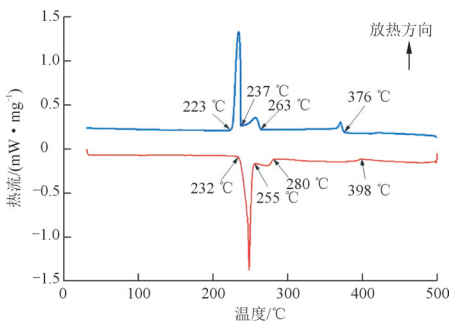


图1 SnSbCu11-6合金的DSC曲线

Fig.1 DSC curves of SnSbCu11-6 alloy

制备半固态浆料的超声处理装置示意图和流程图见图2。超声处理装置主要由超声波控制器、超声波变幅杆、超声波换能器、加热炉组成。将1 kg SnSbCu11-6合金在中频炉中加热至550 $^{\circ}\text{C}$ 进行熔炼,当温度达到设定值(分别为370、380、390和400 $^{\circ}\text{C}$)时开启超声振动。将超声探头预热,超声功率设为1 200 W,振动频率设为20 kHz,在熔体温度达到260 $^{\circ}\text{C}$ 时停止超声处理,获得相应的半固态浆料,将其倒入直径为90 mm和预热温度为50 $^{\circ}\text{C}$ 的金属型中进行水淬,得到半固态坯料(见图2b)。作为对比试验,将熔体温度为550 $^{\circ}\text{C}$ 的熔体直接倒入预热温度为50 $^{\circ}\text{C}$ 的金属型中,得到常规铸坯。

从坯料中心截取10 mm×10 mm×10 mm的试样,进行镶嵌,依次采用280、400、600、800和1 000号金相砂纸进行研磨,然后采用0.5 μm 的金刚石抛光膏进行抛

光,最后采用质量分数为 5%FeCl 溶液进行蚀刻。采用光学显微镜(OM, Nikon ECLIPSE MA200)、X 射线衍射仪(XRD, Empyrean 型)、扫描电镜(SEM, Nova NanoSEM 450)观察试样的显微组织。从坯料径向方向截取圆棒拉伸试样(见图 2c),在室温下使用 Z150 万能电子拉伸试验机以 1 mm/min 的拉伸速率测试试样的拉伸性能,每个拉伸试样测量 3 次取平均值。采用 HVS-1000Z 维氏硬度计(载荷为 612.9 N,加载时间 15 s)对每个试样进行 5 次显微硬度测量,取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 物相分析

对不同超声处理启振温度下的试样进行 XRD 分析,见图 3。可以看出,液态浇注和施加超声处理后的试样组织均由 α -Sn 相、 β -SnSb 相和 η -Cu₆Sn₅ 相组成。合金中未发现其他新相,表明超声处理未改变 SnSbCu11-6 合金的物相组成。超声处理后 SnSb 相主峰强度有所增加,可能是超声处理使熔体内溶质分布更加均匀,SnSb 相倾向于沿晶向生长。另外, η -Cu₆Sn₅ 相和 β -SnSb 相峰的半高宽有所变宽,说明超声处理有利于

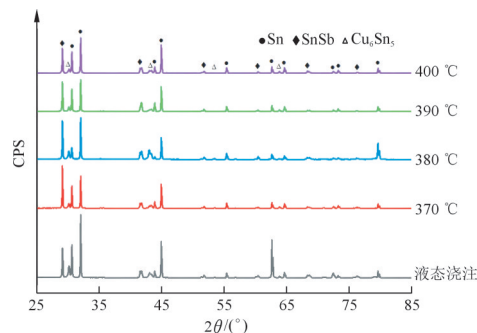


图 3 SnSbCu11-6 合金不同启振温度时的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of SnSbCu11-6 alloy under different oscillation temperatures

η -Cu₆Sn₅ 相和 β -SnSb 相的细化。

超声处理启振温度为 380 °C 时不同物相的 EDS 见图 4。可以看出,点 1 处灰色物相主要由 Sn 元素组成, Sb 含量较低,为 Sb 元素固溶于 Sn 元素中形成的基体 α -Sn 相(见图 4b)。点 2 为灰白色规则块体,其 $x(\text{Sn})/x(\text{Sb}) \approx 1.3:1$ (见图 4c),推测为 β -SnSb 相。点 3 为黑色短棒状或不规则块状, Cu 和 Sn 的摩尔分数比 $x(\text{Cu})/x(\text{Sn}) \approx 6:4.6$ (见图 4d),可确定为 η -Cu₆Sn₅ 相。EDS 分析相组成与 XRD 分析结果一致。

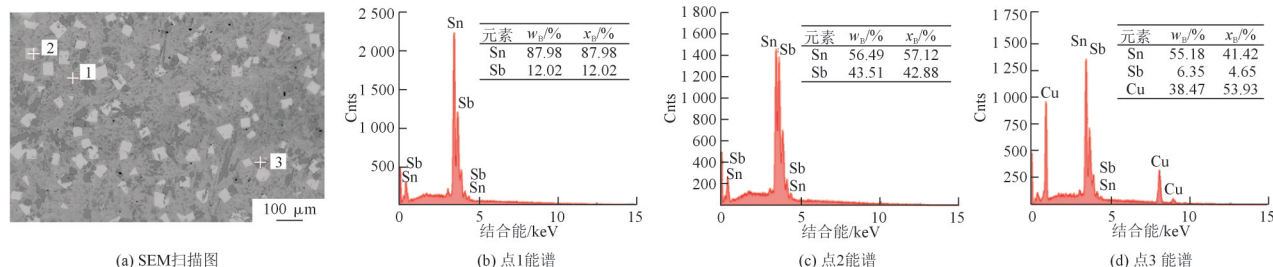


图 4 超声启振温度 380 °C 时不同物相的 SEM 形貌及 EDS

Fig.4 SEM morphologies and EDS results of different phases at ultrasonic oscillation temperature of 380 °C

2.2 启振温度对显微组织的影响

图 5 为不同启振温度下的 SnSbCu11-6 合金的显微

组织及 SnSb 相平均晶粒尺寸。可以看出,传统液态浇注时 SnSb 相尺寸粗大,形貌呈不规则蝶形或花瓣形且

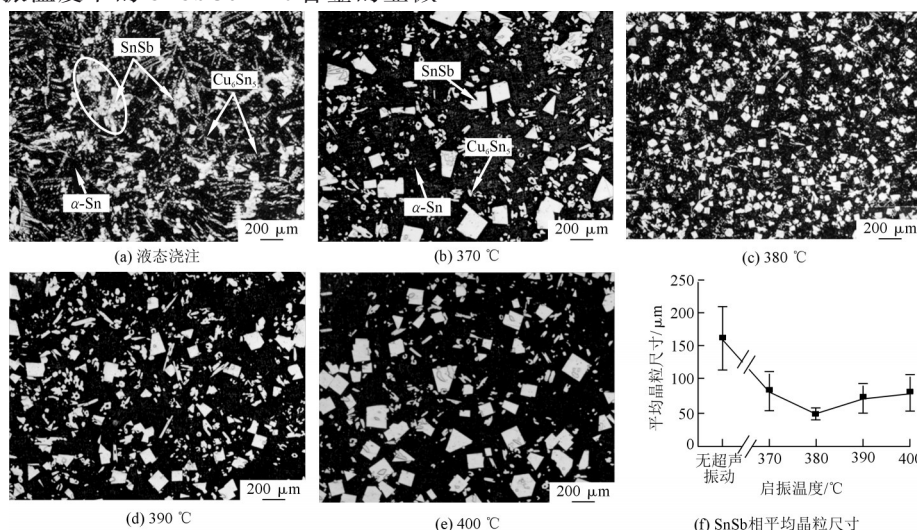


图 5 不同启振温度下合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of alloys at different oscillation temperatures

容易团聚, Cu_6Sn_5 相呈细长针状(见图 5a)。传统铸造凝固过程中, 熔体内部溶质场和温度场不均匀, SnSb 相和 Cu_6Sn_5 相易择优生长, 细长针状或花瓣状的尖端容易造成应力集中, 在变形过程中切割基体并形成裂纹源, 从而降低合金的综合性能。施加不同启振温度超声处理后, SnSb 相和 Cu_6Sn_5 相的形貌和分布发生了显著变化, SnSb 相呈规则的方块状, Cu_6Sn_5 相呈短棒状或点状, 分布均匀性也明显改善, 这有利于改善变形过程中的协调性, 提高合金的力学性能(见图 5b~图 5e)。

液态铸造时, SnSb 相平均晶粒尺寸为 $(160 \pm 48.4) \mu\text{m}$ 。当超声处理启振温度分别为 370、380、390 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 时, SnSb 相平均晶粒尺寸分别为 (81.9 ± 28.2) 、 (48.3 ± 8.2) 、 (71.4 ± 19.6) 和 $(79.8 \pm 26.2) \mu\text{m}$, 380 $^{\circ}\text{C}$ 时细化效果最佳。超声处理主要依靠超声波

在熔体中产生的空化效应形成局部过冷促进晶粒的形核和细化晶粒, 在声流作用下促使晶核游离而均匀分布在熔体内部。若超声启振温度过高, 晶粒形核温度过高, 晶核还未长大就可能被重熔, 导致启振温度过高时形成的有效晶核数量相对较少, 晶粒尺寸偏大, 见图 5d 和图 5e。当熔体温度接近液相线温度时, 在空化效应下形成的晶核数量最多, 且基本都可以生长成为晶粒, 此时熔体的黏度适中, 在声流作用下晶粒分布也相对均匀, 见图 5c。当温度低于液相线温度时, 此时熔体内部已经形成部分晶核, 晶核易长大, 另外熔体的黏度较大, 不利于空化泡的产生和破裂, 抑制熔体内部的形核, 导致晶粒尺寸相对较大, 见图 5b。

无超声处理和不同超声处理启振温度时显微组织的 SEM 和面扫描见图 6。可以看出, 无超声处理时,

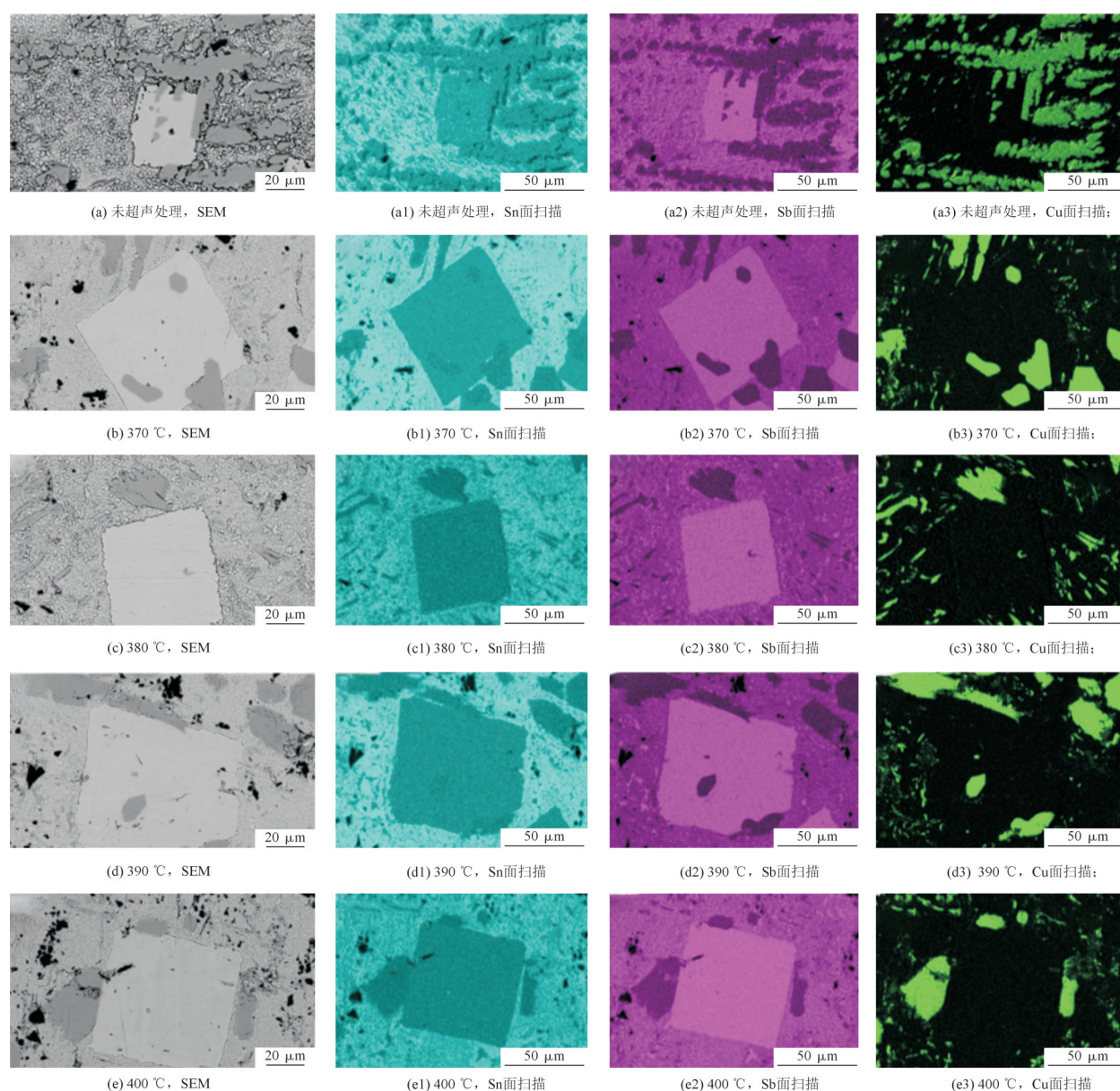


图 6 不同启振温度时的 SEM 形貌和元素面扫描

Fig.6 SEM morphologies and element distribution of SnSbCu11-6 alloy at different oscillation temperatures

Cu_6Sn_5 相呈树枝晶或细长针状分布在基体中,存在团簇和局部择优生长的趋势(图 6a)。施加超声处理后, Cu_6Sn_5 相被细化为颗粒状、点状或短杆状,局部择优生长趋势和团簇现象得到明显改善。

2.3 启振温度对性能的影响

2.3.1 显微硬度

SnSbCu11-6 合金在不同启振温度下的显微硬度见图 7。根据 Hall-Petch 关系^[15],晶粒细化可提高合金的硬度。未施加超声处理时,显微组织以粗大树枝晶或细针状为主,显微组织致密度差,维氏硬度(HV)低,为 22.2。随着启振温度升高,合金维氏硬度呈先升高后降低的趋势,当启振温度为 370 °C 时,显微组织显著细化,团簇减少,位错密度增加,阻碍了晶体的滑移变形,硬度(HV)为 24.2。随着启振温度升高至 380 °C,合金组织分布更加均匀,显微组织最为细小,晶粒细化增加了晶界面积,使位错在晶界处更容易被钉扎,从而增加晶界处的位错密度,此时合金硬度最高,为 27.4,较无超声处理时提高了 23.4%。随着启振温度继续提高至 390 °C 和 400 °C,晶粒粗化,晶界面积减少,硬度略有下降,硬度(HV)分别为 25.8 和 24.5。

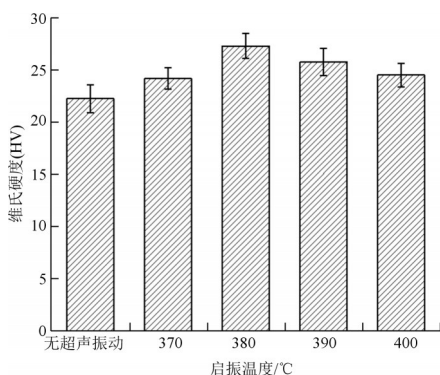


图 7 SnSbCu11-6 合金的显微硬度

Fig.7 Microhardness of SnSbCu11-6 alloy

2.3.2 力学性能

不同超声处理启振温度下 SnSbCu11-6 合金的室温力学性能见图 8。可以看出,未施加超声处理时合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 66.31 MPa、57.92 MPa 和 2.3%。随着超声处理启振温度升高,合金的抗拉强度和伸长率都呈现先增加后下降的趋势,与 SnSb 相平均晶粒尺寸变化趋势一致。超声处理启振温度为 380 °C 时,合金的综合性能最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 70.25 MPa、60.61 MPa 和 4.86%,较未超声处理时分别提高了 5.9%、4.6% 和

11.3%。抗拉强度和屈服强度主要取决于晶界阻碍位错滑移的能力。 SnSbCu11-6 合金的抗拉强度和屈服强度主要受 Cu_6Sn_5 相的影响^[16]。超声处理虽然细化了 Cu_6Sn_5 相,但 Cu_6Sn_5 相与基体无取向关系,变形时容易成为裂纹源而阻碍位错运动,导致超声处理对 SnSbCu11-6 合金的抗拉强度和屈服强度的增强效果不明显。 SnSbCu11-6 合金的塑性变形能力主要取决于 SnSb 相的大小和分布, SnSb 相与基体存在半共格界面关系, SnSb 相的尺寸越细小,分布越均匀,合金的变形越均匀,这有利于减少应力集中,延缓裂纹形成和发展,从而提高合金的塑性^[17]。

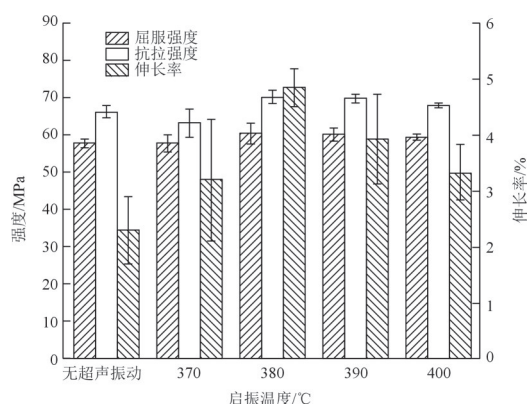


图 8 不同超声处理启振温度下合金的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of alloy at different ultrasonic oscillation temperatures

未超声处理和不同超声处理启振温度的 SnSbCu11-6 合金的拉伸断口形貌见图 9。 Cu_6Sn_5 相和 SnSb 相均为硬脆相, Cu_6Sn_5 相断口呈光滑平面状,而 SnSb 相断口呈河流状或解理平台状,拉伸断口为穿晶断裂,表现为典型的脆性断裂。 $\alpha\text{-Sn}$ 相为软基体,断口上往往分布着大量细小的凹痕,表现出典型的韧性断口^[16]。 Cu_6Sn_5 相和 SnSb 相在铸坯中粗大且分布不均,在拉伸变形过程中容易产生应力集中导致断裂。基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相不能起到软基体的缓冲作用,断裂机理以脆性断裂为主(见图 9a)。经超声处理后, Cu_6Sn_5 相和 SnSb 相的尺寸和分布均得到改善,与基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相形成半相干界面的 SnSb 相可以抑制位错滑移,软基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相的变形能力在拉伸变形过程中得以释放。断口上有一定数量的凹痕,断裂机制是脆性断裂和韧性断裂的结合(图 9b、图 9d 和图 9e)。超声处理启振温度为 380 °C 时, Cu_6Sn_5 相和 SnSb 相的尺寸最小,晶粒细化有利于阻止裂纹的形成和扩展, SnSb 相与基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相的协同变形能力进一步增强。基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相中存在大量小凹陷,断裂机理以韧性断裂为主,脆性断裂为辅(见图 9c)。

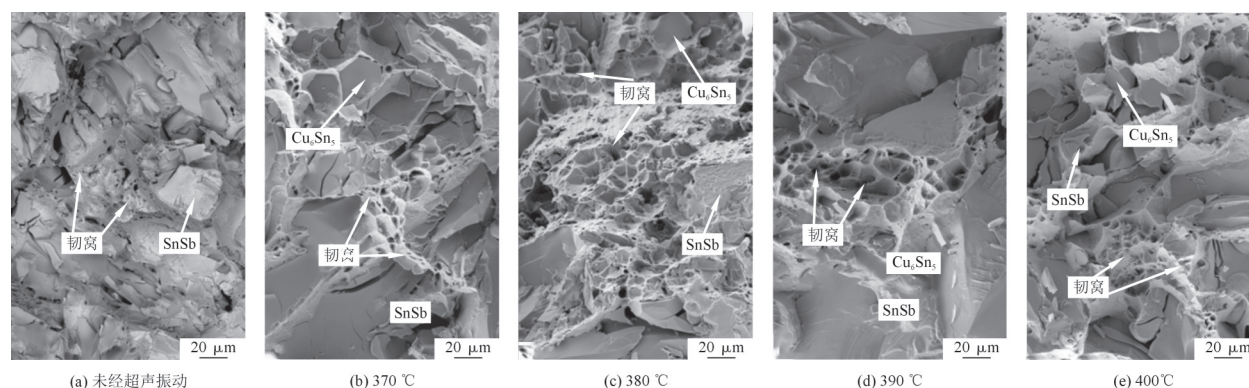


图9 不同超声处理启振温度下 SnSbCu11-6 合金断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of SnSbCu11-6 alloy at different ultrasonic oscillation temperatures

3 结 论

(1)施加超声振动处理后,SnSb相和 Cu_6Sn_5 相得到显著细化且分布均匀性明显改善,SnSb相形貌由不规则蝶形或花瓣状转变为规则的方块状, Cu_6Sn_5 相形貌由细长针状转变为短棒状或点状。

(2)超声启振温度为380 °C时,合金综合性能最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为70.25 MPa、60.61 MPa和4.86%,较未超声处理时分别提高了5.9%、4.6%和111.3%。

参 考 文 献

- [1] 王昌皓. 网格钢板巴氏合金 MIG 堆焊层制备与激光表面改性[D]. 湖南衡阳: 南华大学, 2022.
- [2] 朱福生. Al-Zn 合金轴瓦材料的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2009.
- [3] 付艳超, 王馨, 毛丹丹, 等. 巴氏合金干滑动摩擦磨损机制分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 32-35, 27.
- [4] 孙凯. 高承载锡基巴氏合金材料研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [5] CHANDRASHEKHARAIH T M, KORI S A. Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al-Si alloys [J]. Tribology International, 2009, 42(1): 59-65.
- [6] CHEN S, RICHTER B, MORROW J D, et al. Pulsed laser remelting of A384 aluminum, Part I: Measuring homogeneity and wear resistance [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 606-614.
- [7] NI Y Q, DONG G N, TONG Z, et al. Effect of laser remelting on tribological properties of Babbitt alloy [J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096 570.
- [8] MARTINEZAYERS R A. Formation and processing of rheocast microstructures [D]. Massachusetts of USA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [9] 史坤. 超声振动下 AZ91D 镁合金半固态浆料微观组织演变[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [10] 赵立. 高能超声振动制备半固态稀土镁合金及成形技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

- [11] HU Y J, ZHENG H T. Effects of ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of semisolid Sn-52Bi alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2016, 31(5): 1 063-1 067
- [12] ZHENG H T, HU Y J, LI R J, et al. Effects of direct ultrasonic treatment on microstructure and elongation of semi-solid Sn-62Bi alloy [J]. China Foundry, 2015, 12(3): 163-168.
- [13] ZHAO J W, WU S S, AN P, et al. Preparation of semi-solid slurry of hypereutectic Al-Si alloy by ultrasonic vibration [C]// Proceedings of the 10th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. Aachen, Germany, 2008.
- [14] JIAN X G. The effect of ultrasonic vibration on the solidification of light alloys [D]. Tennessee of USA: The University of Tennessee, 2005.
- [15] SATO Y S, UATA M, KOKAWA H, et al. Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A354(1-2): 298-305.
- [16] SADYKOV F A, BARYKIN N P, VALEEV I S, et al. Influence of the structural state on mechanical behavior of tin Babbitt [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12(1): 29-36.
- [17] SADYKOV F A, BARYKIN N P, VALEEV I S. Influence of temperature and strain rate on the mechanical properties of B83 Babbitt with different structures [J]. Strength of Materials, 2002, 34(2): 196-199.

(编辑:刘晨辉)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!