



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.18

Ag、Co、Cr元素对锡基巴氏合金显微组织及结合性能的影响

程战¹, 董显², 张远海³, 王蒙¹, 龙伟民^{1,2}, 朱挺³, 张雷¹,
周吉发¹, 王鑫华¹

1. 中国机械总院集团 宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波 315700
2. 郑州机械研究所有限公司 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001
3. 浙江申科滑动轴承科技有限公司, 浙江 绍兴 311800

摘要: 为解决巴氏合金承载能力低、与钢基体结合强度差等问题, 采用感应熔炼工艺制备了 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)巴氏合金, 研究了添加微量元素 Ag、Co、Cr 对巴氏合金 SnSb12Cu7.5Ni0.9 微观组织、界面形貌及结合强度的作用规律。结果表明, SnSb12Cu7.5Ni0.9 合金中分别添加 1% 的 Ag、Co、Cr 元素后, 组织中的方块状 SnSb 相细化且略有钝化, 颗粒状 η 相 (Cu_6Sn_5) 相由细长条状逐渐转变为蠕虫状。巴氏合金/钢基体界面处存在一层相互连接的过渡层, 添加 1% Ag、Co、Cr 后界面处过渡层厚度增加, 组织均匀性得到改善, 并提高了巴氏合金/钢基体结合强度, 其中添加 1% Co 元素的结合强度最高, 为 51.9 MPa, 较基体提高了 13%。

关键词: 巴氏合金; 微观组织; 界面形貌; 结合强度

中图分类号: TH142.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)11-0113-06

Effect of Ag, Co and Cr on Microstructure and Bonding Property of tin-based Babbitt Alloy

CHENG Zhan¹, DONG Xian², ZHANG Yuanhai³, WANG Meng¹, LONG Weimin^{1,2}, ZHU Ting³,
ZHANG Lei¹, ZHOU Jifa¹, WANG Xinhua¹

1. China Academy of Machinery Ningbo Academy of Intelligent Machine Tool Co., Ltd., Ningbo 315700, China
2. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China
3. Zhejiang Shenke Slide Bearing Technology Co., Ltd., Shaoxing 311800, China

Abstract: Babbitt alloy SnSb12Cu7.5Ni0.9-X (Ag, Co, Cr) was prepared by induction smelting. The effects of trace elements Ag, Co and Cr on the microstructure, interfacial morphology and bonding strength of SnSb12Cu7.5Ni0.9 were studied. The results show that with the addition of 1% Ag, Co and Cr, the square SnSb phase in SnSb12Cu7.5Ni0.9 alloy structure is refined and slightly passivated. And granular η The phase (Cu_6Sn_5) changes from slender strip to worm-like. There is a layer of interconnected transition layer at the interface between the pasteurized alloy and the steel base. With the addition

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 宁波市“3315”人才计划 2020 年创新团队 C 类; 浙江省异质增材工程研究中心资助项目; 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划 (2022C01187)

作者简介: 程战 (1989—), 男, 博士, 主要从事锡基材料与电弧增材制造工艺等方面的研究及产业化工作。

通信作者: 董显 (1982—), 硕士, 高级工程师, 主要从事钎焊材料与技术研究。E-mail: dongxian83@163.com。

of 1wt.% Ag, Co and Cr, the thickness of the excessive layer at the interface increases and the uniformity of the structure improves. It can also improve the bonding strength of pasteurized alloy/steel matrix. The highest bonding strength is 51.9 MPa when 1wt.% Co is added, which is 13% higher than that of the matrix.

Keywords: Babbitt alloy; microstructure; interface morphology; bonding strength

引用格式:程战,董显,张远海,等. Ag、Co、Cr元素对锡基巴氏合金显微组织及结合性能的影响[J]. 电焊机,2023,53(11):113–118.

Citation:CHENG Zhan, DONG Xian, ZHANG Yuanhai, et al. Effect of Ag, Co and Cr on Microstructure and Bonding Property of tin-based Babbitt Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 113–118.

0 前言

巴氏合金是一种软基体上分布着硬质颗粒相的低熔点轴承合金,以其优异的嵌藏性、顺应性及抗咬合性能广泛应用于汽轮机、汽车、电力、航空航天等领域的关键轴承部件及钢制轴承衬套中。近年来随着航空航天、轨道交通、海洋航运等领域向着高速、重载、大型化等方向飞速发展,对滑动轴承的可靠性能及承载能力提出了更高的要求,而巴氏合金承载能力低、粘合强度差的特点势必造成轴瓦过早失效^[1]。

为改善上述问题,研究人员对其进行了更为深入的研究工作。一方面是探索新型巴氏合金的制备技术。如在静态浇注过程中调节浇注溶液温度、改善挂锡质量、改进冷却措施等以避免巴氏合金晶粒过于粗大,界面结合层脆性化合物 FeSn 及 FeSn₂ 过厚^[2-3];或是采用喷涂法如电弧喷涂、液体喷涂及火焰喷涂等工艺将巴氏合金堆积在轴瓦基体表面,但该方式对设备要求高,制备的涂层厚度及结合强度偏低^[4-7];或是采用镀膜法、磁控溅射等工艺将巴氏合金薄层镀覆至基体表面,但此工艺成本较高,制备的涂层厚度也有限制^[8-9]。也有研究人员采用焊接方式对损坏的巴氏合金轴瓦进行修复,此种方式需要严格控制施焊温度,否则会造成基体温度过高,导致界面结合力降低^[10-11]。另一方面是对巴氏合金进行改性强化。陈永红^[12]研究了微量元素 Cd 对巴氏合金 SnSb11Cu6 的微观组织及力学性能的作用规律,发现 Cd 元素能够起到细晶强化及固溶强化的作用,当 Cd 含量为 0.5% 左右时合金强度、塑性及硬度同时增加。Abioye 等^[13]通过粉末冶金工艺将 3%~9%SiC 加入 Sn-Sb-Cu 巴氏合金中,发现添加 9%SiC 时性能优异,与 Sn-Sb-Cu 巴氏合金相比

硬度提高约 43%,抗压强度提高约 55%,耐磨性提高约 80%。陈润霖^[14]等在 ZSnSb11Cu6 巴氏合金中加入 0~4% Cu 粉以研究提高 Cu 含量对其力学性能的影响,发现添加 Cu 含量至 7%~8% 时可有效提高材料的高温硬度和软化温度。

现有研究通过改进制备工艺或是添加元素及硬质颗粒等改善合金性能,鉴于 Ag、Co、Cr 元素与 Sn 元素具有较强的亲和力,在组织凝固过程中可调控基体微观结构^[15-16]。本文通过感应熔炼工艺分别将 1% 的 Ag、Co、Cr 加入 SnSb12Cu7.5Ni0.9 巴氏合金中研究掺杂微量 Ag、Co、Cr 对 Sn-Sb-Cu 巴氏合金微观组织、界面形貌及粘接强度的影响。本文得到了工信部产业基础再造和制造业高质量发展专项的支持。

1 试验方法

试验以 SnSb12Cu7.5Ni0.9 巴氏合金作为基体,通过调控纯度为 99.9% 的钴块、银块、Cr 颗粒的添加比例制备出 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)合金,其化学成分如表 1 所示。采用感应熔炼工艺将纯锡熔化,随后加入铜块、铋块、镍丝、银块、钴块及 Cr 颗粒调节熔炼温度至 550 °C,保温 1 h,熔炼过程中加入适量木炭作为覆盖剂。保温结束后降低温度至 480 °C,随后加入适量的氯化铵作为精炼剂,精炼结束后使用纯石墨棒搅拌 5 min,浇注至预热后的模具中,空冷至室温获得铸锭组织。

采用线切割截取相同部位的铸锭及重力浇铸的巴氏合金/钢界面试样,用 SiC 砂纸进行粗磨,选用粒度为 2 μm 的金刚石抛光膏进行精磨,采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀至变色,通过蔡司显微镜观察其微观组织及界面形貌。将巴氏合金/

表 1 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)巴氏合金名义成分
(质量分数, %)

Table 1 Nominal composition of SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr) (wt. %)							
合金	Sn	Sb	Cu	Ni	Ag	Co	Cr
基体	余量	12	6	0.9	0	0	0
基体-1 Ag	余量	12	6	0.9	1	0	0
基体-1 Co	余量	12	6	0.9	0	1	0
基体-1 Cr	余量	12	6	0.9	0	0	1

钢界面试样机加工成内径 24 mm、外径 38 mm 的钢基体,如图 1 所示。巴氏合金层外径 28.82 mm、厚度 5 mm,符合国标 GB/T 12948—1991《滑动轴承 双金属结合强度破坏性试验方法》的标准结合试样,随后通过万能拉伸试验机进行测试,横梁位移速率为 2 mm/min。

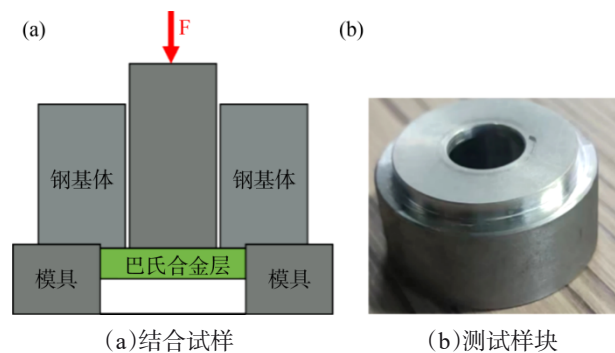


图 1 巴氏合金/钢结合试样

Fig. 1 Babbitt alloy/steel bonding specimen

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

加入 Ag、Co、Cr 改性的锡基巴氏合金组织如图 2 所示。由图 2a 可知,巴氏合金基体组织主要由黑色的锡基 α 固溶体组织(Sb 溶于锡的固溶体)、白色方块状 β 相(SnSb)相及细长条状或棒状的 η 相(Cu_6Sn_5)相组成。加入 1%Ag 元素后,如图 2b 所示,白色方块状 β 相(SnSb)尺寸略有减小,颗粒状的 η 相(Cu_6Sn_5)相含量降低。如图 2c 所示,加入 1%Co 元素后,组织中的颗粒状 η 相(Cu_6Sn_5)明显聚集,相互连接成星状,方块状的 β 相(SnSb)尺寸也略有减小。加入 1%Cr 元素后,如图 2d 所示,组织中的方块状 β 相(SnSb)尺寸显著减小,边角明显钝化,颗粒状的 η 相(Cu_6Sn_5)由细长条状转变为蠕虫状均匀分布

在整个组织中。

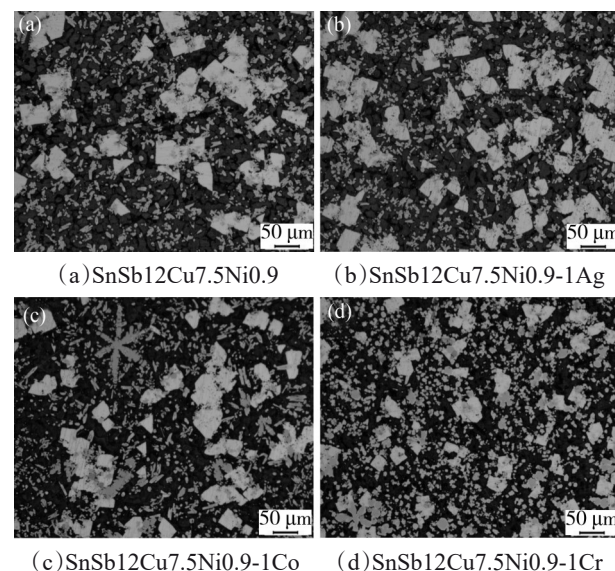


图 2 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)巴氏合金显微组织

Fig. 2 Microstructure of SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag, Co, Cr)
Babbitt alloy

巴氏合金力学性能与微观组织息息相关。凝固过程中,掺杂的高熔点 Ag、Co、Cr 元素能够作为结晶核心,降低形核驱动力,促进形核。Ag 元素与 Cr 元素的加入与基体中的 Sn 元素形成尺寸类似 Cu_6Sn_5 相的 Ag_3Sn 、 CrSn_2 化合物^[16-17], Co 元素与 Sn 元素形成花朵状的 CoSn_2 化合物^[18],而这些化合物的出现一方面会消耗巴氏合金中的 Sn 元素,组织中的硬质相相比于软基体 α 固溶体比例相对增多,另一方面率先于 β 相(SnSb)析出,与随后生成的 Cu_6Sn_5 相形成网状,抑制密度较轻的方块状 β 相(SnSb)上浮,凝固后的合金组织更加细小均匀。

2.2 界面形貌

界面属于两种材料间的连接过渡区,是双金属复合材料特有且极为重要的组成部分。在巴氏合金/钢基体双金属复合材料制备过程中,由于固相钢基体对液相巴氏合金溶体的冷作用与液相巴氏合金溶体对固相钢基体的热作用,在钢基体界面处形成了一层过渡层,该过渡层性能的优劣影响结合性能的高低,直接关系到工件服役过程中机组的安全与稳定性。SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)合金界面形貌如图 3 所示。由图 3a 可知,巴氏合金/钢界面处存在一薄层过渡组织,白色方块状 β 相(SnSb)相依托于过渡层组织形核生长。加入 1%Ag 后,过

渡层明显增厚,巴氏合金侧组织中的条状 η 相(Cu_6Sn_5)相逐渐圆润,如图3b所示。加入1%Co元素后,界面处存在部分依托于过渡层生长的脆性化合物,并向巴氏合金侧延伸。而加入Cr元素后,界面处巴氏合金侧组织较为均匀,组织中的条状 η 相(Cu_6Sn_5)相转变为圆润的蠕虫状颗粒均匀分布在组织中,部分白色化合物依托于过渡层向巴氏合金中延伸。在巴氏合金溶体与钢基体复合过程中,结合界面处发生了复杂的物化反应,导致了界面区域原子键结合与原子结构的化学成分与界面两侧的基体成分有差异,此外添加的高熔点元素Ag、Co、Cr在凝固过程中依托于固相钢基体界面形核生长,且Ag、Co、Cr元素自身与巴氏合金基体中Sn元素的原子亲和力存在差异,故而结合区域性质明显区别于界面两侧合金。

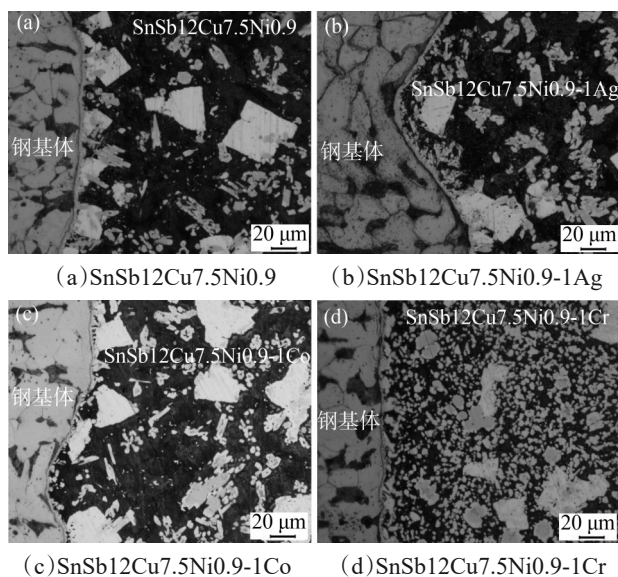


图3 SnSb12Cu7.5Ni0.9-X(Ag、Co、Cr)合金界面形貌

Fig. 3 Interface morphology of SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag, Co, Cr) alloy

2.3 结合强度

采用万能拉伸试验机测试巴氏合金/钢基体结合强度,结果如图4所示,断口形貌如图5所示。可以发现,未掺杂元素改性时结合强度为45.7 MPa,加入1%Ag、Co、Cr后结合强度均有所提高,其中加入1%Co时,抗拉强度取得最大值为51.9 MPa。结合图5中的断口形貌可以发现,基体的断口中粘接在钢侧的巴氏合金较少,断裂于界面处,如图5a所示;加入1%Ag后钢侧界面粘接的组织明显增多,但

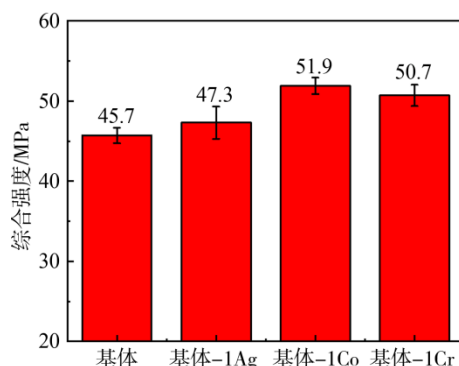


图4 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)合金/钢基体结合强度

Fig. 4 Bond Strength of SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag, Co, Cr) Alloy/Steel Matrix

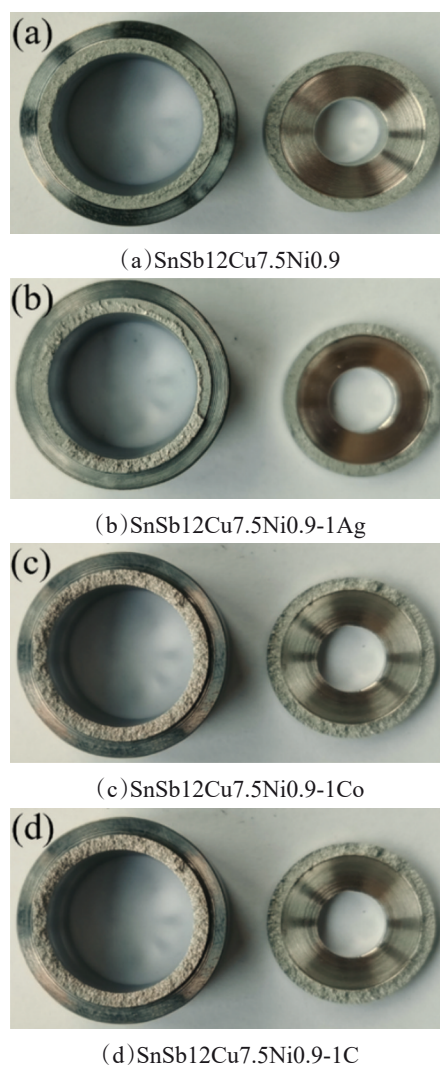


图5 SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag、Co、Cr)合金/钢基体断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of SnSb12Cu7.5Ni0.9-x(Ag, Co, Cr) alloy/steel matrix

仍有约 1/3 处断裂于钢基体, 如图 5b 所示; 加入 1%Co、Cr 后, 巴氏合金/钢结合试样断裂于巴氏合金处, 如图 5c、5d 所示。

界面是双金属复合结构两者之间的连接过渡区, 在浇注过程中液态巴氏合金对固相钢基体的热作用及固态钢基体对巴氏合金溶体的冷作用, 将在巴氏合金/钢界面处形成与溶体内部不同的界面结合过渡区, 该结合过渡区的结构包括界面处析出相、界面处元素相互扩散情况、界面微区结构、结合状态、是否有新的化合物形成及是否存在缺陷等, 其结构的状态关乎于结钢基体结合强度。

3 结论

(1) SnSb12Cu7.5Ni0.9 合金中添加 1 wt.% Ag、Co、Cr 元素能改善合金组织。Ag、Co、Cr 元素以 Ag_3Sn 、 CoSn_2 、 CrSn_2 化合物的形式存在于组织中, 方块状 SnSb 相细化且尖角略有钝化, 颗粒状 η 相 (Cu_6Sn_5) 相由细长条状逐渐转变为蠕虫状。

(2) 巴氏合金/钢基体界面处存在一层相互连接的过渡层, 分别添加 1%Ag、Co、Cr 后界面处过渡层厚度增加, 组织均匀性改善, 巴氏合金/钢基体结合强度提高, 其中添加 1%Co 元素的结合强度最高为 51.9 MPa, 较基体提高了 13%。

(3) 对比三种改性成分巴氏合金的微观组织及界面结合强度, 加入 1%Co 元素获得的力学性能最佳, 更适用于高速、重载的轴瓦材料。

参考文献:

- [1] 刘昱阳, 殷鹏, 张帆, 等. 巴氏合金轴瓦结合工艺研究进展[J]. 重型机械, 2021(06): 1-7.
- LIU Y Y, YIN P, ZHANG F, et al. Research progress of babbitt alloy bearing bonding technology[J]. Heavy Machinery, 2021(06): 1-7.
- [2] 南飞艳, 耿建成, 薛飞, 等. 挂锡质量对巴氏合金浇铸的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(15): 260-261.
- NAN F Y, GENG J C, XUE F, et al. Influence of Tin-coat Quality on Babbitt Casting[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(15): 260-261.
- [3] 王尧, 王建梅, 黄玉琴, 等. 锡界面层最佳厚度试验与模拟研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 106-113.
- WANG Y, WANG J M, HUANG Y Q, et al. Experiment and Simulation Research on Optimum Thickness of Tin Interfacial Layer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 106-113.
- [4] 吴俊辉, 杜学铭, 田金华, 等. SnSb8Cu5 巴氏合金脉冲 MIG 堆焊层与基体界面组织及性能分析[J]. 焊接技术, 2020, 49(06): 26-30.
- WU J H, DU X M, TIAN J H, et al. Microstructure and properties of interface between Sn Sb8Cu5 Babbitt pulsed MIG surfacing layer and substrate[J]. Welding Technology, 2020, 49(06): 26-30+5.
- [5] 陈剑锋, 黄炜, 李锋, 等. 电弧增材制造技术在滑动轴承领域的应用[J]. 轴承, 2021(07): 1-7.
- CHEN J F, HUANG W, LI F, et al. Application of Arc-Additive Manufacturing Technology in the Field of Sliding Bearings[J]. Bearing, 2021(07): 1-7.
- [6] 安建勇, 黄玉琴. 基于巴氏合金 CMT 技术的工艺性研究[J]. 上海大中型电机, 2022(01): 26-30.
- AN J Y, HUANG Y Q. Research on technology based on Babbitt alloy CMT technology[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2022(01): 26-30.
- [7] Junior P A, Pukaszewicz A. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes[J]. Tribology International, 2018: 131.
- [8] 李长生, 王芬, 胡志立, 等. 磁控溅射 Sn-Sb-Cu 薄膜的制备及摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2013(9): 1-5.
- LI C S, WANG F, WU Z L, et al. Preparation and Tribological Properties Research of Magnetron Sputtered Sn-Sb-Cu Films[J]. Lubrication Engineering, 2013(9): 1-5.
- [9] 周卫铭, 郭忠诚, 龙晋明, 等. 电镀铅锡锑巴氏合金[J]. 机械工程材料, 2005, 29(1): 27-29.
- ZHOU W M, GUO Z C, LONG J M, et al. Electroplating of Pb-Sn-Sb Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(1): 27-29.
- [10] 张胜全, 张博, 王一纯, 等. 钎焊温度对锡基巴氏合金/钢基体过渡层组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(7): 694-697.
- ZHANG S Q, ZHANG B, WANG Y C, et al. Effect of Brazing Temperature on the Transition Layer Microstructure of the Steel and Sn Based Babbitt Metal[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(7): 694-697.
- [11] 李铜桥. 轴承巴氏合金补焊试验研究[J]. 汽轮机技

- 术, 2013(1): 79-80.
- LI T Q. Repair Welding Test and Research for Babbitt Metal of Bearing[J]. Turbine Technology, 2013(1): 79-80.
- [12] 陈永红, 钟宁, 尹忠慰, 等. 微量元素 Cd 对锡基轴承合金 SnSb11Cu6 组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(6): 1226-1232.
- CHEN Y H, ZHONG N, YIN Z W, et al. Effects of micro-adding Cd on microstructure and mechanical properties of SnSb11Cu6 tin-based bearing alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(6): 1226-1232.
- [13] Tea A, Hz B, Maia B, et al. Effects of SiC additions on the microstructure, compressive strength and wear resistance of Sn-Sb-Cu bearing alloy formed via powder metallurgy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 13196-13205.
- [14] 陈润霖, 卫洋洋, 贾谦, 等. 提高 Cu 含量对锡基巴氏合金力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1854-1859.
- CHEN R L, WEI Y Y, JIA Q, et al. Effect of Increasing Cu Content on the Mechanical Properties of Tin-based Babbitt[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(6): 1854-1859.
- [15] 王蒙, 钟素娟, 张冠星, 等. Ni、Cr、Co 元素对 Sn-0.7Cu 钎料组织和显微硬度的影响[J]. 轻工科技, 2021, 37(01): 60-61+74.
- WANG M, ZHONG S J, ZHANG G X, et al. Effect of Ni, Cr and Co elements on the organization and microhardness of Sn-0.7Cu braze[J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(01): 60-61+74.
- [16] DONG Q, YIN Z, LI H, et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu Babbitt. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 225-230.
- [17] BANG J, Yu D Y, KO Y H, et al. Intermetallic compound formation and mechanical property of Sn-Cu-xCr/Cu lead-free solder joint[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017: 992-1001.
- [18] FAN J L, LIU Z Y, ZHAI H T, et al. Effect of Co content on the microstructure, spreadability, conductivity and corrosion resistance of Sn-0.7Cu alloy[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 107: 113615.
- [19] 王蒙, 张冠星, 钟素娟, 等. 低熔合金粉末对药芯银钎料钎焊过程的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(08): 2859-2866.
- WANG M, ZHANG G X, ZHONG S J, et al. Effect of Low-melt Alloy Powder on Brazing Process of Flux-cored Silver Brazing Filler Metal[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(08): 2859-2866.