

DOI: 10. 11973/jxgccl240049

ZCuSn10P1 铜合金表面堆焊 SnSb9Cu7 巴氏合金的界面组织和性能

王 显¹, 王文先¹, 郭风云², 周丽丹²

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 2. 中德新材料智能制造研究院 (山西)有限公司, 太原 030000)

摘 要: 采用冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊在 ZCuSn10P1 铜合金上堆焊 SnSb9Cu7 巴氏合金, 研究了界面处的显微组织和微区成分, 测试了结合强度和微纳力学性能。结果表明: 铜合金与巴氏合金堆焊层之间存在厚度约 140 μm 的界面层, 实现了冶金结合; 界面处平整光滑, 无微裂纹、气孔等缺陷, 形成了 $\alpha+\delta$ 相; 巴氏合金堆焊层由 SnSb 相、 Cu_6Sn_5 相和 $\alpha\text{-Sn}$ 基体组成, 显微组织均匀细小, 无明显偏析, 硬质相颗粒尺寸约 35 μm ; 界面结合强度约 101 MPa, 断裂主要发生在巴氏合金堆焊层中硬质相处; 巴氏合金堆焊层、铜合金、界面层的显微硬度分别为 6.199, 7.401, 8.205 GPa。

关键词: 冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊; 锡基巴氏合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG47

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2025)01-0065-06

0 引 言

轴瓦是滑动轴承中最重要的零部件, 其质量和寿命对轴承的性能起到了举足轻重的影响。巴氏合金因具有较好的润滑性、镶嵌性和耐磨减摩性等性能, 已成为最主要的滑动油膜轴承轴瓦材料^[1-4], 广泛应用于燃气轮机、汽车、风力发电机等领域^[5-6]。但是, 由于巴氏合金本身较软, 通常需要搭配强度较高的钢质轴承背套才能承受重载^[7], 而由于巴氏合金与钢基体物性参数差异较大, 二者的界面结合强度较低。张忠礼等^[8]在球墨铸铁基体上制备了 11-6 巴氏合金电弧喷涂涂层, 涂层与基体的结合强度低, 仅 20 MPa。研究^[9-11]发现, 目前约 98% 的企业使用的传统离心铸造法制备的巴氏合金轴瓦存在严重的偏析现象, 与钢基体连接界面的结合强度低, 界面处存在气孔、夹杂物、疏松等缺陷, 这都会使轴承在使用过程中极易脱落, 甚至报废。研究者们尝试将其他制备技术应用于钢基表面巴氏合金层, 以改善二者连接问题^[12-16]。通过引入铜合金作为中间过渡层, 在铜合金表面采用冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊制备巴氏合金层可以有效解决因钢和巴氏合金热膨胀

系数、熔点、硬度、化学成分及组织差异大而引起的连接质量差的问题。冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊热输入小, 成形质量好, 制备的铜合金-巴氏合金层界面质量好。

基于此, 作者采用冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊在 ZCuSn10P1 铜合金上堆焊 SnSb9Cu7 巴氏合金, 研究了界面区域的显微组织和微区成分, 测试了结合强度和微纳力学性能, 以期冷金属过渡技术加工轴承零件方面积累经验, 促进油膜滑动轴承广泛应用。

1 试样制备与试验方法

试验基材为尺寸 100 mm \times 100 mm \times 20 mm 的 ZCuSn10P1 铜合金板, 焊材为直径 1.6 mm 的 SnSb9Cu7 巴氏合金焊丝。采用 TPS 500i CMT 型焊机进行冷金属过渡熔化极钨极氩弧堆焊, 焊接电流为 150 A, 焊接电压为 14.4 V, 保护气体为纯度 99.99% 的氩气, 堆焊层厚度为 3.5 mm。

根据 GB/T 12948—1991, 采用 SHIMADZU AGS-X 型拉伸试验机使用双金属结合强度破坏性试验法对巴氏合金与铜合金进行结合强度测试, 测试过程如图 1 所示, 铜合金试样尺寸为 $\phi 38$ mm \times $\phi 24$ mm \times 16 mm, 巴氏合金试样尺寸为 $\phi 28$ mm \times $\phi 12$ mm \times 7 mm, 巴氏合金堆焊在铜合金表面, 两者中心轴重合, 拉伸速度为 2 mm \cdot min⁻¹。结合强度

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075360, 52274390)

作者简介: 王显(2000—), 男, 陕西安康人, 硕士研究生

通信作者(导师): 王文先教授

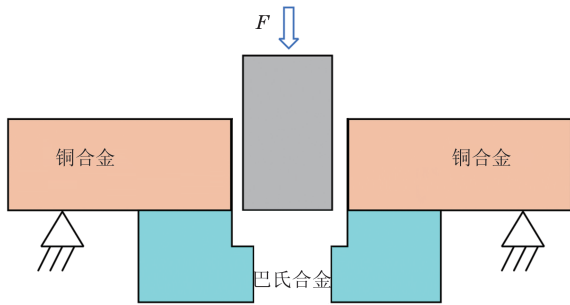


图1 结合强度测试示意

Fig. 1 Schematic diagram of bonding strength test

计算公式为

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为结合强度; F_{\max} 为试样断裂瞬间的压力; A 为铜合金与巴氏合金界面的面积。

用 800[#]~2 000[#] 砂纸逐级磨抛金相试样,再用体积分数 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀,采用 OLYMPUS-BX53M 型光学显微镜(OM) 观察显微组织。采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜(SEM) 观察微观形貌和结合面断口形貌,采用配套的能谱仪(EDS)分

析微区成分。采用 Nano Indenter G200 型纳米力学测试仪测试微纳力学性能,分别在巴氏合金、界面层和铜合金处各设置一条测试路径,路径间压点错开,点间等距,载荷为 50 mN。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 2 可见:巴氏合金堆焊层与铜合金之间存在明显的界面层,厚度约为 140 μm ,说明实现了冶金结合,界面处平整光滑,无微裂纹、气孔等缺陷;巴氏合金堆焊层主要由白色块状 SnSb 相、树枝状 Cu_6Sn_5 相和 α -Sn 基体组成,不同相之间分布均匀,SnSb 相和 Cu_6Sn_5 相属于硬质点颗粒, α -Sn 基体较软且塑性较好;界面处存在片层状组织,这是 α -Cu 与 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (δ) 的混合相。在 520 $^{\circ}\text{C}$ 下发生 $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ 共析转变,在 350 $^{\circ}\text{C}$ 下发生 $\delta \rightarrow \alpha + \varepsilon$ 共析转变,但是由于焊后在室温下冷却,冷却速率快,导致扩散困难,因此 $\delta \rightarrow \alpha + \varepsilon$ 共析转变难以发生, δ 相被保留下来,其作为硬质相,可以提高材料强度、降低塑性。

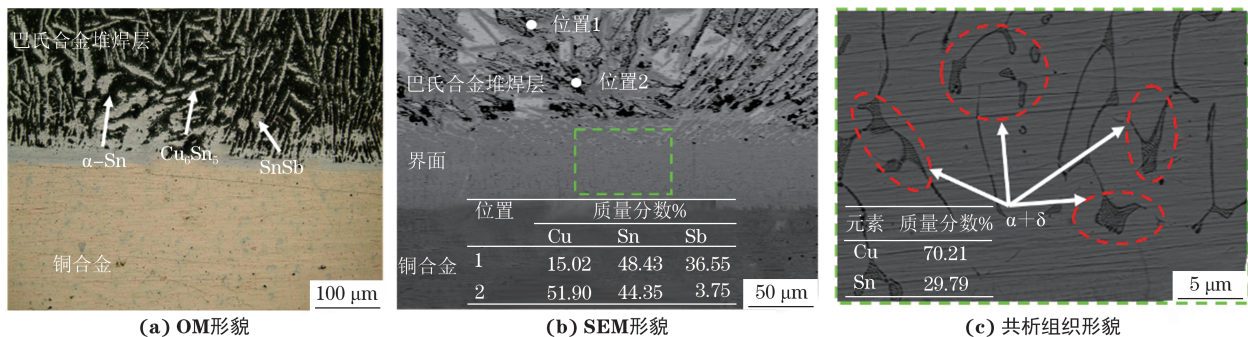


图2 巴氏合金堆焊层与铜合金界面处的显微组织

Fig. 2 Microstructure at interface between Babbitt alloy cladding layer and copper alloy: (a) OM morphology; (b) SEM morphology and (c) eutectoid structure morphology

在堆焊凝固过程中,巴氏合金熔体在 189 $^{\circ}\text{C}$ 下由铜和锡形成 Cu_6Sn_5 相,然后以块状均匀弥散析出 SnSb 相。冷金属过渡熔化极钨极氩弧焊冷却速率快,巴氏合金层在极短的时间内完全凝固,使得 Cu_6Sn_5 和 SnSb 两种硬质相的形核率较高,原子扩散距离较短,而且来不及发生明显的重力偏析,可得到较为细小均匀的硬质相组织;统计可得,两种硬质相颗粒尺寸约为 35 μm ,而传统离心铸造制备轴瓦的硬质相颗粒尺寸达到 95 μm ^[17]。此外,在快速冷却过程中, Cu_6Sn_5 相优先在温度梯度最大的界面处形核结晶,垂直于熔池边界以条状或棒状形态向熔池内生长;通常情况下,当温度降至 186 $^{\circ}\text{C}$ 时, Cu_6Sn_5 相作为典

型金属间化合物,会由高温 η - Cu_6Sn_5 结构转变为低温 η' - Cu_6Sn_5 结构,然而堆焊时的凝固过程为快速、非平衡过程,高温 η - Cu_6Sn_5 相没有足够的温度和时间进行相变而保留到室温;随着凝固过程的进行且温度梯度逐渐减小, η - Cu_6Sn_5 相结晶形貌转变为枝晶并垂直于界面层生长。

由图 3 可见:巴氏合金堆焊层中的锡、锑元素向铜合金中扩散,而铜合金中的铜元素向堆焊层中扩散,在界面层中出现聚集,推测可能是生成了新相 $\alpha + \delta$ 相。在焊接过程中,巴氏合金丝材与铜合金基体表面发生电弧热自熔,在焊接热作用下合金元素沿浓度梯度方向扩散,形成具有一定厚度的界面层。

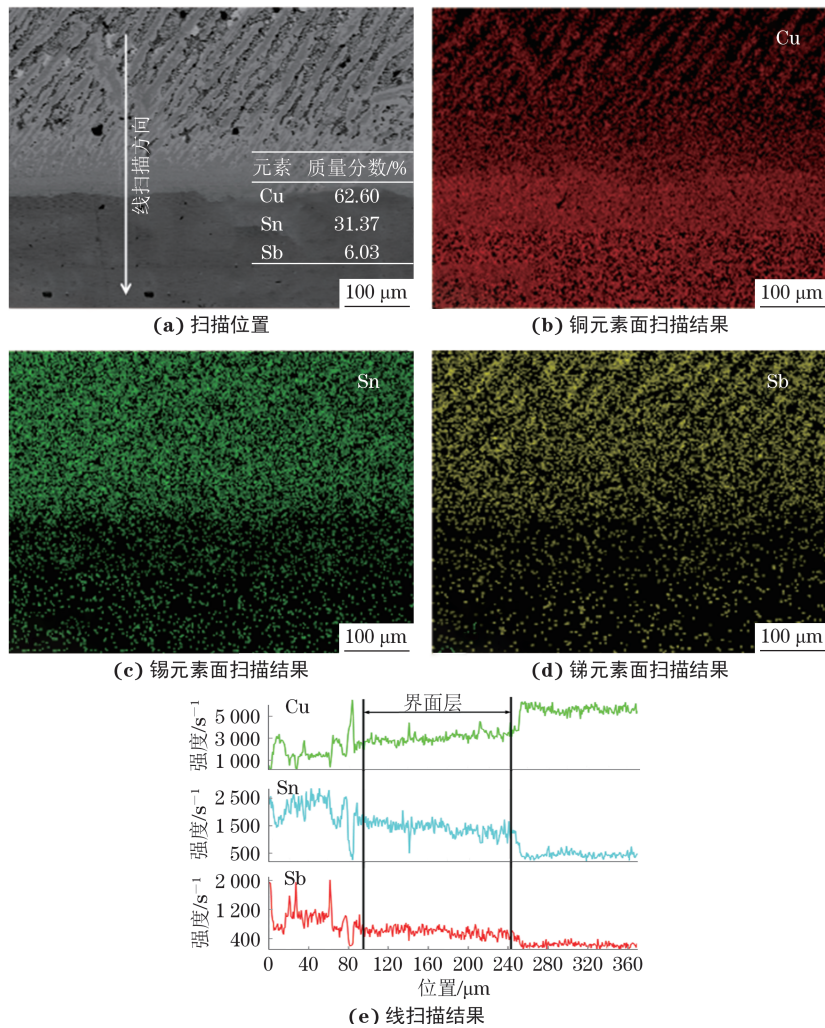


图3 巴氏合金堆焊层与铜合金界面处的EDS扫描位置和结果

Fig. 3 EDS scanning position (a) and results (b–e) at interface between Babbitt alloy welding layer and copper alloy: (b) Cu surface scanning result; (c) Sn surface scanning result; (d) Sb surface scanning result and (e) line scanning result

界面层的形成表明两种材料实现了冶金结合。

2.2 结合强度及断口形貌

试验测得冷金属过渡熔化极钨极氩弧堆焊制备巴氏合金与铜合金的结合强度为101 MPa, 与传统离心铸造工艺(52 MPa^[14])相比提高了约194%, 这

是因为结合界面实现了冶金结合, 显微组织尺寸细小。由图4可见: 断裂主要发生在巴氏合金堆焊层中, 说明界面层强度高于巴氏合金堆焊层强度; 断口处分布着撕裂棱和解理台阶, 少量区域还分布有凹坑和韧窝, 断裂位置主要在SnSb和Cu₆Sn₅相上。综上,

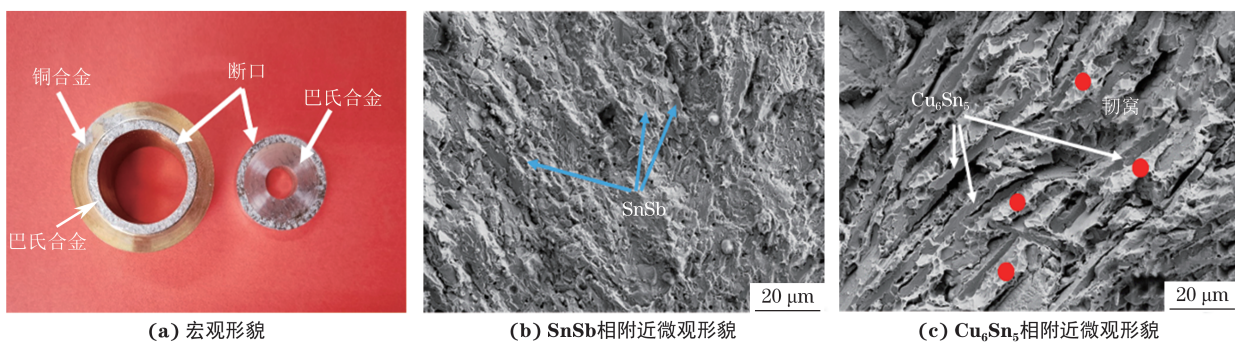


图4 结合强度测试后巴氏合金堆焊试样的断口宏观和微观形貌

Fig. 4 Fracture macromorphology (a) and micromorphology (b–c) of Babbitt alloy welding layer sample after bonding strength test: (b) near SnSb phase and (c) near Cu₆Sn₅ phase

巴氏合金堆焊层与铜合金发生了良好的冶金结合,两者结合强度主要取决于巴氏合金堆焊层的强度以及堆焊层中硬质相的分布。

2.3 微纳力学性能

由图5可见:巴氏合金堆焊层中的压痕最深,铜合金中压痕次之,界面层压痕最浅,三者显微硬度分别为6.199, 7.401, 8.205 GPa。在堆焊过程中,巴氏合金焊丝在铜合金基体表面快速熔化后又迅速凝固,铜元素向锡基巴氏合金堆焊层内扩散并发生冶金反应生成金属间化合物,形成结合界面层,且界面处显微硬度较高,这也是其强度提高的主要原因^[18-24]。

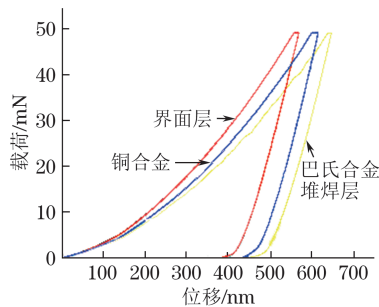


图5 巴氏合金堆焊试样的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of Babbitt alloy welding layer sample

3 结论

(1)巴氏合金堆焊层与铜合金基体之间形成了厚度约为140 μm 的界面层,二者实现了冶金结合,界面处平整光滑,无微裂纹、气孔等缺陷,形成了 $\alpha+\delta$ 相;巴氏合金堆焊层由SnSb相、 Cu_6Sn_5 相和 $\alpha\text{-Sn}$ 基体组成,显微组织均匀细小,无明显偏析,硬质相(SnSb、 Cu_6Sn_5)颗粒尺寸约35 μm 。

(2)巴氏合金堆焊层与铜合金的结合强度约101 MPa,断裂主要发生在堆焊层中,起源于硬质相处。巴氏合金堆焊层、铜合金和界面层显微硬度分别为6.199, 7.401, 8.205 GPa,界面层硬度最高。

参考文献:

[1] 郭正兴,何永勇,路新春. 巴氏合金ZSnSb8Cu4的摩擦磨损行为[J]. 润滑与密封, 2014, 39(7): 5-10.
GUO Z X, HE Y Y, LU X C. Tribological performance of tin-based white metal ZSnSb8Cu4[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(7): 5-10.

[2] ZEREN A, FEYZULLAHOGLU E, ZEREN M. A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding[J]. Materials and Design, 2007, 28(1): 318-323.

[3] ZHOU F M, ZHANG Q Y, SHI M X, et al. The effect of TIG arc brazing current on interfacial structure and bonding strength of tin-based babbitt[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017, 31(21): 2312-2322.

[4] DIOUF P, JONES A. Investigation of bond strength in centrifugal lining of Babbitt on cast iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(3): 603-609.

[5] 覃文杰,王琨. 大型汽轮机轴瓦巴氏合金离心浇注工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2018(4): 5-6.
QIN W J, WANG K. Research on centrifugal casting process of Babbitt for heavy duty steam turbine bearing bush[J]. Heavy Casting and Forging, 2018(4): 5-6.

[6] 王建梅,薛亚文,马立新,等. 蠕变对巴氏合金ZChSnSb11-6力学性能和显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014(10): 2513-2518.
WANG J M, XUE Y W, MA L X, et al. Influence of creep on mechanical properties and microstructures of Babbitt alloy ZChSnSb11-6[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(10): 2513-2518.

[7] 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.

[8] 张忠礼,段思华,张洪兵,等. 电弧喷涂锡基巴氏合金涂层的组织与性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 17.
ZHANG Z L, DUAN S H, ZHANG H B, et al. Microstructure and properties of arc sprayed tin-based Babbitt coating[J]. Transactions of China Welding Institution, 2010, 31(4): 17.

[9] 叶小芳. 离心浇注巴氏合金轴瓦粘结不牢的因素分析[J]. 铸造技术, 2012, 33(6): 750-751.
YE X F. Analysis on effect factors of low bond strength in centrifugal casting Babbitt alloy[J]. Foundry Technology, 2012, 33(6): 750-751.

[10] 赵强,李向阳,曹佳丽,等. 抽水蓄能电站巴氏合金上导轴瓦损坏原因分析[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 107-110.
ZHAO Q, LI X Y, CAO J L, et al. Failure analysis of upper guide bush of Babbitt alloy for pumped storage station[J]. Yangtze River, 2017, 48(20): 107-110.

[11] 裴自力. 行星轴巴氏合金失效分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(22): 235-237.
PEI Z L. Failure analysis on planet pinion shaft Babbitt metal[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(22): 235-237.

[12] DONG Q, YIN Z W, 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: A*, 2018, 722: 225-230.
- [13] KAMAL M, EL-BEDIWI A, LASHIN A R, et al. Copper effects in mechanical properties of rapidly solidified Sn-Pb-Sb Babbitt bearing alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530: 327-332.
- [14] 郝云波, 赵凯, 杨萍, 等. 激光熔覆锡基巴氏合金微观组织和力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(10): 2016-2023.
- HAO Y B, ZHAO K, YANG P, et al. Microstructure and mechanical properties of tin-based Babbitt alloy made by laser cladding deposition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(10): 2016-2023.
- [15] 张伟. 锡基巴氏合金减摩材料激光重熔组织与硬度的研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(8): 32-34.
- ZHANG W. Research on microstructure and hardness of tin-base Babbitt alloy made by laser remelting[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(8): 32-34.
- [16] 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 and Nonferrous Alloys*, 2016, 36(7): 694-697.
- [17] 宋振亚, 彭孜, 闫鸣, 等. 制备方法对锡基巴氏合金轴瓦组织及性能的影响[J]. *稀有金属*, 2021, 45(3): 378-384.
- SONG Z Y, PENG Z, YAN M, et al. Microstructures and mechanical properties of tin-based Babbitt bearings with different fabrication methods[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(3): 378-384.
- [18] 王震, 杜学铭, 田金华, 等. 铜基体表面巴氏合金堆焊层制备工艺与组织性能分析[J]. *焊接技术*, 2020, 49(9): 5-9, 167.
- WANG Z, DU X M, TIAN J H, et al. Analysis of preparation process and microstructure and performance of Babbitt alloy overlay on copper substrate[J]. *Welding Technology*, 2020, 49(9): 5-9, 167.
- [19] 卢忠华. 船舶柴油机轴承巴氏合金堆焊技术的研究及应用[J]. *金属加工(热加工)*, 2017(增刊1): 40-43.
- LU Z H. Research and application of Babbitt surfacing technology for marine diesel engine bearings[J]. *MW Metal Forming*, 2017(S1): 40-43.
- [20] 张小龙, 张国富, 戴登峰, 等. 滑动轴承增材制造用巴氏合金成分与线材制备技术综述及市场潜力分析[J]. *世界有色金属*, 2023(6): 40-44.
- ZHANG X L, ZHANG G F, DAI D F, et al. The overview and market potential analysis of the Babbitt alloy composition and wire preparation technology for sliding bearing with additive manufacturing[J]. *World Nonferrous Metals*, 2023(6): 40-44.
- [21] 王昌皓, 李必文, 邓彬, 等. Q235B薄板网格表面巴氏合金MIG堆焊层制备与组织性能分析[J]. *锻压装备与制造技术*, 2022, 57(1): 79-83.
- WANG C H, LI B W, DENG B, et al. Application of precision cold roll forming technology in sheet metal automatic production[J]. *China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology*, 2022, 57(1): 79-83.
- [22] 阙铭鑫, 柏兴旺, 周祥曼, 等. 表面毛化对巴氏合金MIG堆焊层界面组织及结合强度的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(10): 239-245.
- QUE M X, BAI X W, ZHOU X M, et al. Effect of surface texturing on the interfacial microstructure and bonding strength of Babbitt alloy cladding by MIG welding[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(10): 239-245.
- [23] 巩连河, 赵子龙, 叶春明, 等. 电站用球型轴承巴氏合金层的焊接修复[J]. *山东电力技术*, 2008, 35(1): 38-39.
- GONG L H, ZHAO Z L, YE C M, et al. Repairing of Babbitt alloy layer of spherical bearing used in power station[J]. *Shandong Electric Power*, 2008, 35(1): 38-39.
- [24] 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(1): 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(1): 26-30.

Interfacial Microstructure and Properties of ZCuSn10P1 Copper Alloy Surfacing SnSb9Cu7 Babbitt Alloy

WANG Xian¹, WANG Wenxian¹, GUO Fengyun², ZHOU Lidan²

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. ZHONGYI Institute of Advanced Materials and Intelligent Manufacture (Shanxi) Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: The SnSb9Cu7 Babbitt alloy as surfacing on the ZCuSn10P1 copper alloy by cold metal transition molten tungsten argon arc welding. The microstructure and micro-composition at the interface were studied, and the bonding strength and micro-nano mechanical properties were tested. The results show that an interfacial layer of about 140 μm thickness was formed between copper alloy and Babbitt alloy cladding layer, indicating that metallurgical bonding. The interface was smooth, and the interfacial layer had no micro-cracks, pores and other defects, and was composed of $\alpha + \delta$ phase. The Babbitt alloy cladding layer was composed of SnSb phase, Cu_6Sn_5 phase and α -Sn matrix. The microstructure of the cladding layer was uniform and fine, no obvious segregation was found, and the hard phase particle size was about 35 μm . The bonding strength of the interface was about 101 MPa, and the fracture mainly occurred in hard phases of Babbitt alloy cladding layer. The microhardness of Babbitt alloy cladding layer, copper alloy and the interfacial layer was 6.199, 7.401 and 8.205 GPa, respectively

Key words: cold metal transition molten tungsten argon arc welding; Babbitt alloy; microstructure; mechanical property

《机械工程材料》官方网站和微信公众号

竭诚为广大读者、作者服务

为适应数字化、网络化对科技期刊的冲击和挑战,上海材料研究所有限公司期刊展览事业部投入大量资金和人力,对“材料与测试”网进行了全新改版。新版网站除了原有的期刊集群功能以外,还增设了“行业资讯”板块,每天更新报道材料与测试等相关领域的最新研究动态和热点新闻、大量的原创技术文章和优秀译文以及知名厂商发布的最新仪器和相关技术信息;另外还设有“图书订阅”版块,可供读者在线购买《机械工程材料》等上海材料研究所有限公司主办的多本期刊以及其他技术书籍。编辑部联系方式

投稿时请大家认准《机械工程材料》杂志官方

网站(<https://jxgccl.mat-test.com>),原集群网—材料与测试网(www.mat-test.com)仍在使用中。

欢迎广大读者、作者关注《机械工程材料》杂志微信公众号。



《机械工程材料》编辑部