

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.11.12

SnSb11Cu6 巴氏合金机器人 TIG 堆焊层组织及力学性能

郑 琿¹, 孙 超², 刘正武¹, 邓 越¹, 马飞煌¹, 常 超¹

1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245

2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100094

摘要: 为满足大型船舶、工程机械等领域高效低速柴油机滑块对高承载、耐磨损、长寿命的需求, 采用机器人 TIG 焊接技术在 Q235B 钢表面制备 SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层。通过金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)表征堆焊层的微观组织和界面元素分布, 测试界面结合强度, 并采用着色渗透法检测堆焊层表面质量。结果显示, 堆焊层与基体之间形成了良好的冶金结合, 过渡区域稀释层尺寸均匀, 约为 20 μm , 无明显的元素偏析和冶金缺陷。力学性能测试显示, 堆焊层硬度均匀, 平均硬度为 28.0 HB, 堆焊层与基体的平均结合强度达 51.22 MPa, 组内测试数据波动小, 表明界面结合质量稳定且满足高强度工况要求; 着色渗透检测未发现表面缺陷。研究结果显示了 SnSb11Cu6 巴氏合金在 Q235B 钢表面形成了性能优异的堆焊层, 满足低速重载润滑等工况下的应用需求。

关键词: 巴氏合金; 机器人 TIG 堆焊; 界面结合强度; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)11-0090-06

Microstructure and Mechanical Properties of SnSb11Cu6 Babbitt Alloy Robot TIG Cladding Layer

ZHENG Hui¹, SUN Chao², LIU Zhengwu¹, DENG Yue¹, MA Feihuang¹, CHANG Chao¹

1. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245, China

2. China Aerospace Science and Technology Group Corporation, Beijing 100094, China

Abstract: To meet the performance requirements of high-load, wear-resistant, and long-life for the sliders of high-efficiency low-speed diesel engines in large ships, engineering machinery, and other fields, robot TIG welding technology is employed to prepare SnSb11Cu6 Babbitt alloy cladding layers on the surface of Q235B steel. The microstructure and interface element distribution of the cladding layer are characterized through optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). The interfacial bonding strength is tested, and the dye penetration method is utilized to inspect the surface quality of the cladding layer. Results show that a good metallurgical bond is formed between the cladding layer and the substrate, with a uniform dilution layer size of approximately 20 μm in the transition area, without apparent elemental segregation and metallurgical defects. Mechanical property tests indicate that the hardness of the overlay layer is uniform, with an average hardness of 28.0 HB, and the average bonding strength between the cladding layer and the substrate reaches 51.22 MPa, with small data fluctuations within the group, suggesting that the interfacial bonding quality is stable and meets the requirements of high-strength working conditions; no surface defects were found through dye penetration inspection. The research results demonstrate that SnSb11Cu6 Babbitt alloy forms a high-performance cladding layer on the surface of Q235B steel, meeting the application demands under low-speed, heavy-duty lubrication conditions.

Keywords: Babbitt alloy; robot TIG cladding; interfacial bonding strength; microstructure; mechanical properties

引用格式: 郑琿, 孙超, 刘正武, 等. SnSb11Cu6 巴氏合金机器人 TIG 堆焊层组织及力学性能[J]. 电焊机, 2025, 55(11): 90-95.

收稿日期: 2024-10-23 修回日期: 2025-03-02

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”扬帆专项(22YF1417200)

作者简介: 郑 琿(1999—), 男, 硕士, 主要从事焊接与增材研究。E-mail: blgz987@163.com。

Citation: ZHENG Hui, SUN Chao, LIU Zhengwu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of SnSb11Cu6 Babbitt Alloy Robot TIG Cladding Layer[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(11): 90–95.

0 引言

在大型船舶、工程机械等领域的高效低速柴油机中, 滑块作为连杆与活塞间的关键传动部件, 需长期承受低速重载工况下的周期性载荷与滑动摩擦, 其表面性能直接决定柴油机的传动效率、润滑稳定性及服役寿命^[1]。此类滑块不仅要求本体材料具备足够的结构强度与韧性, 更要求接触面具有优异的耐磨性、抗疲劳性及减摩特性。常规结构钢(如 Q235B 钢)虽能满足本体强度需求, 但其表面硬度低、耐磨性差, 无法满足滑块接触面的严苛工况, 因此需要表面改性技术制备高性能防护涂层^[2-3]。

巴氏合金是一种具有减摩特性的轴承合金, 主要包括锡基和铅基合金。这种合金因其高熔点、出色的耐磨性、良好的嵌入性和抗疲劳性能, 成为滑块接触面改性的理想材料^[4-6]。目前, 巴氏合金滑块的主要制备方法包括浇铸法、喷涂法和堆焊法^[7]。浇铸法工艺成熟、操作简单、生产成本相对较低, 但冷却不均易导致气孔、裂纹等浇铸缺陷, 需额外加工修改^[3]。喷涂法可形成薄而均匀的涂层, 却因结合强度低难以承受高负荷应用的要求。堆焊法涂层制备效果表现优异, 具有较高的材料利用率和强大的附着力, 能够有效提升滑块性能并显著延长其使用寿命, 适用于重负荷和恶劣工况下的应用^[8-9]。近年来已被广泛应用于高性能滑块的制造和修复中, 特别是在需要长期稳定性的场景下, 如重型机械和高温设备中^[10-11]。

本文以巴氏合金作为研究对象, 采用机器人自动 TIG 焊工艺在 Q235B 钢表面堆焊 SnSb11Cu6 巴氏合金, 重点研究堆焊层结合界面的微观组织及力学性能, 旨在为低速重载柴油机滑块等关键构件的高性能表面改性提供技术支撑与理论参考。

1 巴氏合金堆焊层试样制备

1.1 试验材料及设备

试验选用 Q235B 钢为基板, 尺寸为 200 mm×

300 mm×30 mm。熔敷材料采用 SnSb11Cu6 巴氏合金焊丝, 直径 4 mm, 其化学成分见表 1。采用 KR 210 R2700 extra 机器人搭配自制送丝机构, 焊接电源采用 Fronius MW4000, 自主开发基于 PROFINET 总线的控制系统, 通过总线 I/O 模块实现机器人、焊接电源、送丝机构的实时通讯。

表 1 巴氏合金焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of Babbitt alloy welding wire (wt. %)

牌号	Sn	Sb	Cu	Fe	Zn
SnSb11Cu6	Bal.	11.22	6.01	0.01	0.01

1.2 堆焊工艺

堆焊前采用砂纸打磨基板表面, 打磨后用丙酮进行清洗, 去除基板表面氧化层及油污等杂质。通过单因素变量法开展堆焊工艺参数优化试验, 以焊道成形(无咬边、未熔合)、堆焊层致密度为评价指标, 最终确定最佳工艺参数如表 2 所示。采用该参数堆焊 1 层即可实现 5 mm 厚堆焊层, 单道焊道尺寸为高 3 mm、宽 6 mm, 多道搭接距离 4 mm, 堆焊层表面成形如图 1 所示。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊接电 流/A	焊接电 压/V	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	送丝速度 /(mm·min ⁻¹)	摆动幅 度/mm	气体流量 /(L·min ⁻¹)
180	18	600	600	4/4	10



图 1 表面成形形貌

Fig. 1 Surface formation morphology

1.3 组织分析

采用线切割技术从堆焊试样的界面区域截取金相试样, 经打磨抛光后, 用 Kalling's 试剂腐蚀, 采用 Leika-DM4000 型金相显微镜, JSM-7001F 型扫描电镜(配有 EBSD)观察试样显微组织。

1.4 力学性能分析

按照 GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第1部分:试验方法》在 XHB/3000+CCD 型布氏硬度计上测试,每个试样进行3次硬度采集,取平均值作为布氏硬度。

根据 GB/T 12948—1991《滑动轴承双金属结合强度破坏性试验方法》,对巴氏合金堆焊层和 Q235B 钢基体进行结合强度测试。以堆焊层与基体的交界处作为结合面基准加工试样,样品的示意图和实物如图2所示。

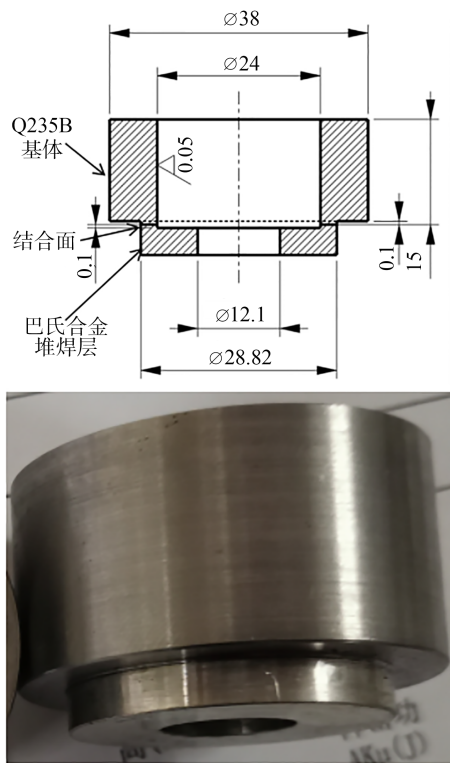


图2 样品示意和实物

Fig. 2 Schematic diagram and physical image of the sample

按照规定,采用应力控制拉伸速度,拉伸速度设定为 $10 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 。试验过程中实时记录拉伸应力-应变曲线,并记录最大试验荷载。每组制备5个平行试样,按公式 $R = F_{\max}/A$ (A 为结合面实际受力面积) 计算结合强度,数值相对误差小于10%。

1.5 表面质量检测

根据 GB/T 18851.2—2008《无损检测 渗透检测 第2部分:渗透材料的检验》,采用着色渗透法检测堆焊层表面缺陷。检测前对堆焊层表面进行预处理:用铣削加工去除堆焊层表面约2 mm,均匀涂覆

渗透剂并静置15 min,随后用专用清洗剂清洗表面以去除残余渗透剂,涂覆显像剂显像15 min,进行目视检查,记录缺陷的位置、类型和大小。

2 试验结果

2.1 界面结合层微观组织与化学成分分析

图3为 Q235B 钢/SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层截面的金相组织图像。下层 Q235B 钢中铁素体和珠光体结构均匀,保证了材料的强度和韧性;上层 SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层中晶粒细小,弥散分布着针状与树枝状硬质相,细小晶粒和均匀分布的硬质相提高了巴氏合金堆焊层的硬度和耐磨性;过渡区域(稀释层)尺寸均匀,晶粒沿着熔合线附近生长,形成连续的冶金结合界面。

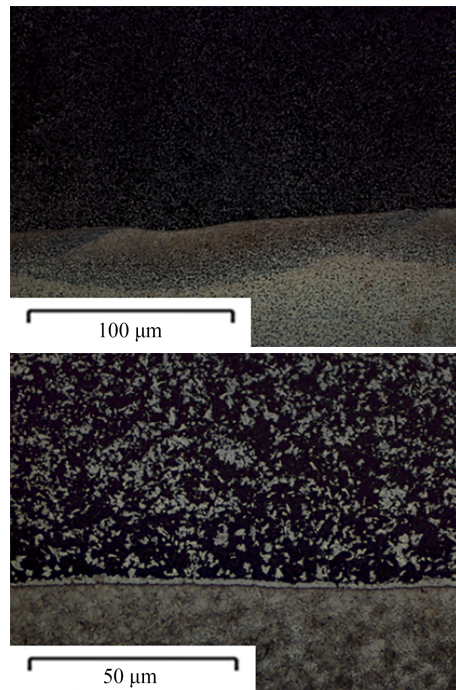


图3 Q235B/SnSb11Cu6 巴氏合金界面层金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of Q235B/SnSb11Cu6 Babbitt alloy interface layer

如图4、表3所示,堆焊试样截面元素分布分析中,基材 Q235B 低碳钢区域(采样点1、2、3)以 Fe 为主要成分,含量超过95%。SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层上部区域(采样点4、7)主要由 Cu 和 Sn 组成,其中 Cu 含量接近25%,Sn 含量接近48%,含8%左右的 Sb, Fe 含量仅15%左右,表明该区域堆焊层纯度

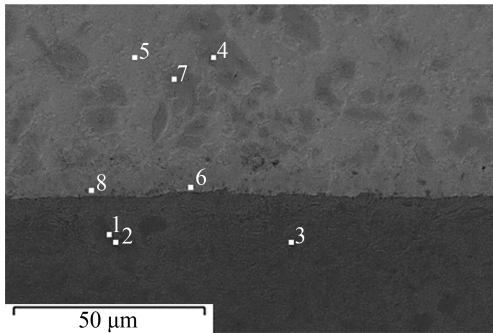


图 4 Q235B/ SnSb11Cu6 巴氏合金界面层点扫描

Fig. 4 EDS point scan of Q235B/SnSb11Cu6 Babbitt alloy interface layer

表 3 Q235B/ SnSb11Cu6 巴氏合金界面层截面元素分布
(质量分数, %)

Table 3 Elemental distribution across the cross-section of Q235B/ SnSb11Cu6 Babbitt alloy interface layer (wt. %)

采样点	Fe	C	Cu	Sn	Sb	O
1	95.84	4.16	0	0	0	0
2	96.10	3.90	0	0	0	0
3	96.63	3.37	0	0	0	0
4	15.21	3.61	23.05	47.90	8.06	2.18
5	0	2.77	0.59	86.70	9.94	0
6	29.94	3.50	1.32	58.39	6.84	0
7	15.71	3.94	24.91	48.05	7.39	0
8	35.94	3.52	1.38	51.86	7.30	0

高, 基材 Fe 的稀释作用较弱。堆焊层中部的局部位置(采样点 5)表现出极高的 Sn 含量(86.7%), 几乎不含 Fe, 指示该点处于堆焊层的高锡区域, 表明堆焊/凝固过程中发生了局部偏析或液相汇集。过渡区(采样点 6、8)存在明显的元素扩散现象, Fe 和 Sn 的含量分别为 30%~36% 和 52%~58%, 显示出堆焊层与基材间的元素互扩散。

图 5 为界面沿垂直熔合线方向的 EDS 线扫描曲线。结合层区域成分变化如下: 0~17 μm 区间, Fe 含量较高, 对应 Q235B 钢基材区, Sn、Sb 含量接近 0, 无明显元素扩散。17~22 μm 区间, Fe 含量明显下降, Sn 和 Sb 含量从 0 迅速升至 45%、8% 左右, 为过渡区(稀释层), 尺寸约 5 μm(与金相观察结果一致); Fe 元素的骤降与 Sn、Sb 元素的骤升, 证实基材 Fe 与堆焊层 Sn、Sb 发生双向互扩散, 是冶金结合的核心区域。22 μm 以后区间, Fe 含量稳定在 15% 左右, Sn、Sb 含量分别稳定在 48%、8% 左右, 进入堆焊层区; 元素含量无明显波动, 证明堆焊层内部成分均匀性良好, 无明显元素偏析。

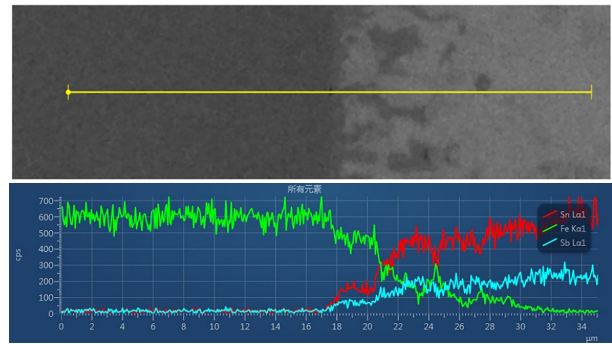


图 5 Q235B/ SnSb11Cu6 巴氏合金界面层线扫描

Fig. 5 EDS line scan of Q235B/SnSb11Cu6 Babbitt alloy interface layer

进一步采用 EDS 面扫描对界面处元素分布进行分析, 如图 6 所示, 其中包括 Fe、Sn、Sb、Cu 和 C 的元素分布。Fe 元素集中于图像下部, 代表 Q235B 钢基体的主要部分, 且在堆焊层中的含量很低, 表明巴氏合金层对铁的溶解或扩散较少。Sn 和 Sb 元素分布在图像的上部区域, 并在巴氏合金堆焊层内表现出均匀分布, 显示 Sn 和 Sb 是堆焊层的主要成分, 二者的均匀分布有助于提升合金的抗磨性能。Cu 元素主要分布于堆焊层区, 呈稀疏和不规则的分布, 局部出现富集区域(与点扫描采样点 5 结果对应), 此类局部富集可形成硬质强化相, 提升堆焊层局部耐磨性。C 元素在整个界面层含量较低且分布均匀, 推测为制造过程中的残留。这些 EDS 分析结果进一步证实 Q235B 与 SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层间存在稳定的元素扩散与均匀的过渡区, 无明显成分缺陷, 对提升合金的综合性能具有关键作用。

2.2 力学性能测试结果

显微硬度是评价巴氏合金堆焊层的一个重要的力学性能指标。Q235B/ SnSb11Cu6 巴氏合金堆焊层表面布氏硬度分布如表 4 所示, 试样的硬度值分别为 28.0 HB、28.3 HB、27.7 HB, 三者的平均硬度值为 28.0 HB, 硬度分布均匀, 反映了巴氏合金堆焊层具有适中的硬度特性, 能够在满足抗磨损性能的同时, 保持足够的柔韧性, 以避免在工作过程中发生脆性断裂。

界面结合强度测试结果如表 5 所示。三组平行试样的结合强度分别为 50.56 MPa、52.84 MPa、50.26 MPa, 平均值达 51.22 MPa, 均超过 50 MPa, 符合 GB/T12948—1991 标准对于“高结合强度双金属

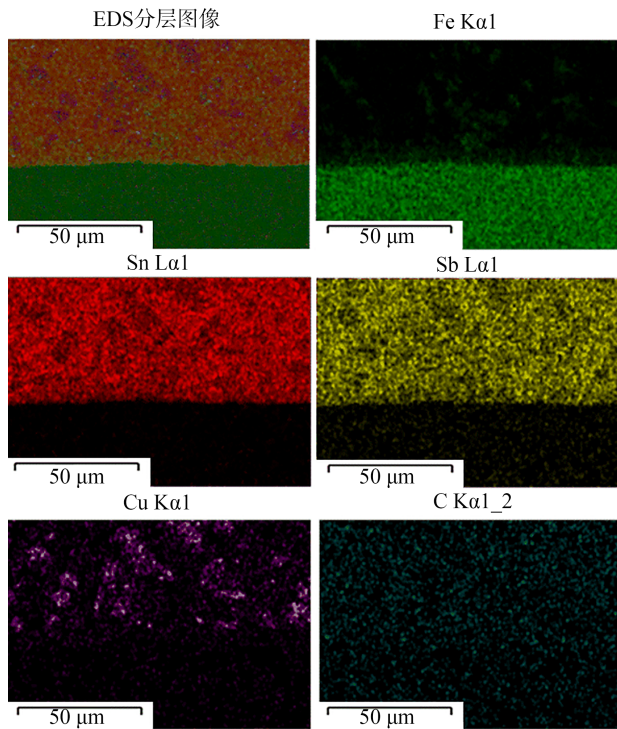


图6 Q235B/SnSb11Cu6巴氏合金界面层EDS面扫描
Fig. 6 EDS mapping of Q235B/SnSb11Cu6 Babbitt alloy interface layer

表4 Q235B/SnSb11Cu6巴氏合金堆焊层表面布氏硬度
Table 4 Surface Brinell hardness of Q235B/SnSb11Cu6 Babbitt alloy overlay layer

样品序号	硬度值/ HB
1	28.0
2	28.3
3	27.7
平均	28.0

界面”的要求,表明堆焊层与基材间的冶金结合质量优异。三组试样的最大试验载荷波动范围仅0.516 kN (10.052 kN~10.568 kN),相对误差小于5%,证明堆焊工艺稳定性良好,不同试样的界面结合状态一致性高,无因工艺波动导致的结合强度异常。三组试样的断裂均发生在堆焊层内部及靠近界面的巴氏合金一侧,而非沿界面分离。断裂处主要呈现韧性撕裂特征,局部可见细微的金属拉出痕迹,表明界面结合强度已高于巴氏合金本体强度。由此可见,堆焊层与基材间的冶金结合牢固,界面强度充足,整体力学性能稳定可靠。

2.3 表面质量检测结果

依据GB/T18851.2—2008标准,采用着色渗透法对堆焊层表面进行无损检测(去除表面2 mm氧化

表5 Q235B/SnSb11Cu6巴氏合金堆焊层结合强度

样品序号	F_{max} /kN	R_a /MPa
1	10.112	50.56
2	10.568	52.84
3	10.052	50.26
平均	10.244	51.22

层后),结果如图7所示。检测中未发现任何肉眼可见缺陷,符合技术条件要求,检测结果合格。



图7 着色检验结果

Fig. 7 Coloring inspection result

3 结论

(1)通过机器人TIG焊工艺在Q235B钢表面堆焊SnSb11Cu6巴氏合金,形成了均匀致密的堆焊层。堆焊层中的晶粒细小且均匀分布,过渡区域的稀释层尺寸均匀,晶粒沿着熔合线生长,表明堆焊层与基体之间形成了良好的冶金结合。

(2)显微硬度测试结果显示堆焊层的硬度值较为均匀,平均硬度为28.0 HB,能够满足滑块接触面抗磨损和耐高温的性能要求。同时,均匀的硬度分布减少了堆焊层的脆性断裂风险,有助于提高材料的使用寿命和可靠性。

(3)结合强度测试表明,堆焊层与Q235B钢基体之间的界面结合强度平均为51.22 MPa,超过国标GB/T 12948—1991的要求。各样品的最大试验载荷和结合强度差异较小,体现了堆焊层制备过程的稳定性和一致性,确保了界面结合质量。着色渗透法检测未发现明显缺陷,表明堆焊层表面质量合格。

(4)综合分析表明,SnSb11Cu6巴氏合金堆焊层

具有优异的微观组织结构和力学性能,在高效低速柴油机滑块等高要求工况下表现出显著的应用潜力。未来研究可进一步优化堆焊工艺参数,提升堆焊层的综合性能,为高性能滑块材料的开发提供技术支持。

参考文献:

- [1] 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 laser cladding tin-based Babbitt alloy [J]. Journal of China Nonferrous Metals Society, 2018, 28(10): 2016–2023.
- [2] Song Z, Zhang L, Liu Y, et al. Improved microstructure and bonding strength via MIG arc brazing in Sn-based Babbitt layer for bearing fabrication [J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 116558.
- [3] Wei M, Sun K, Zhang X, et al. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing [J]. Journal of adhesion science and technology, 2018, 32(19): 2150–2161.
- [4] 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.
CHEN Z, DONG X, ZHANG Y H, et al. The effects of Ag, Co, and Cr elements on the microstructure and bonding properties of tin-based Babbitt alloys [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 113–118.
- [5] Qin D, Yin Z, Li H, et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn–11Sb–6Cu Babbitt [J]. Materials Science & Engineering: A, 2018, 722(4): 225–230.
- [6] Xu T, Zhang S, Wang Z, et al. Wear behavior of graphite self-lubricating Babbitt alloy composite coating on 20 steel prepared by laser cladding [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106698.
- [7] 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.
QIN Z, ZHAO Z W, WEI H D, et al. Research Progress and Preparation Technology of Babbitt Alloy [J]. Thermal Processing Technology, 2016, 45(18): 10–14.
- [8] 郑军武,陈绍,李富坤. CMT堆焊巴氏合金堆焊层组织及力学性能[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 150–153+159.
ZHENG J W, CHEN S, LI F K. Microstructure and Mechanical Properties of CMT Arc Welding Babbitt Alloy Weld Beads [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(1): 150–153+159.
- [9] Dong Q, Yin Z, Li H, et al. Simulation study on filling and solidification of horizontal centrifugal casting babbitt lining of bimetallic bearing [J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15: 119–29.
- [10] Wang X, Yin Z, Chen Y. Study on fatigue strength of SnSb11Cu6 babbitt-steel bimetal sliding bearing material prepared by MIG brazing [J]. Mechanics & Industry, 2020, 21(1): 106.
- [11] Zhang D, Zhao F, Li Y, et al. Study on tribological properties of multi-layer surface texture on Babbitt alloys surface [J]. Applied Surface Science, 2016, 390: 540–549.