

CMT堆焊巴氏合金堆焊层组织及力学性能^①

郑军武¹, 陈绍², 李富坤³

(1.无锡交通高等职业技术学校,江苏 无锡 214151; 2.山东理工大学 材料科学与工程学院,山东 淄博 255000; 3.山东泰山钢铁集团有限公司,山东 济南 271100)

摘要:采用冷金属过渡(CMT)技术在20钢表面制备了巴氏合金堆焊层,利用金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜、能谱仪、维氏硬度计和摩擦磨损试验机分别对堆焊层的金相形貌、物相组成、显微组织、元素分布、硬度和摩擦因数进行测试。结果表明,巴氏合金堆焊层的相结构并未发生变化,由硬质点SnSb相、Cu₆Sn₅相和软基体α-Sn相组成;由于热输入的降低,巴氏合金堆焊层的冷却速率提高,堆焊层晶粒明显细化,硬度约为40HV_{0.1},远高于铸造巴氏合金;由于显微硬度升高,巴氏合金堆焊层的摩擦因数和比磨损率均降低,分别为0.31和 $1.38 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$;巴氏合金堆焊层的磨损机理为磨粒磨损。CMT堆焊技术可有效提升巴氏合金的硬度和耐磨性。

关键词:冷金属过渡焊接;堆焊;巴氏合金;磨损;堆焊层

中图分类号:TB302

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.033

文章编号:0253-6099(2023)01-0150-04

Microstructure and Mechanical Properties of CMT Surfacing Layer of Babbitt Alloy

ZHENG Junwu¹, CHEN Shao², LI Fukun³

(1. Wuxi Institute of Communications Technology, Wuxi 214151, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 3. Shandong Taishan Iron & Steel Group Co Ltd, Jinan 271100, Shandong, China)

Abstract: A surfacing layer of Babbitt alloy was prepared on the surface of steel 20 by cold metal transfer (CMT) welding. And the metallographic morphology, phase composition, microstructure, element distribution, hardness and friction coefficient of the surfacing layer were analyzed by using metallographic microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer, Vickers hardness tester, as well as friction and wear tester. The results show that the phase structure of surfacing layer of Babbitt alloy does not change and is composed of hard point SnSb phase, Cu₆Sn₅ phase and soft matrix α-Sn phase. A lower heat input leads to a rapid cooling rate for the surfacing layer of Babbitt alloy, and the surfacing layer with a finer grain size has hardness around 40HV_{0.1}, much higher than that of cast Babbitt alloy. As the microhardness increases, the friction coefficient and specific wear rate of Babbitt alloy fall down to 0.31 and $1.38 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, respectively. Based on the study of the wear mechanism, it is found that the surfacing layer of Babbitt alloy principally experiences abrasive wear. CMT welding can effectively improve the hardness and wear resistance of Babbitt alloy.

Key words: cold metal transition (CMT) welding; surfacing welding; Babbitt alloy; wear; surfacing layer

巴氏合金因其优异的耐磨性、减摩性、嵌入性、顺应性等,被广泛应用于车用轴承轴瓦、汽轮机、内燃机等领域^[1-3]。离心铸造、静止浇铸等方法制造巴氏合

金轴瓦的主要工艺,但这些工艺制备的轴瓦耐磨性欠佳^[4]。为了改善巴氏合金耐磨性能,文献[5]利用电弧喷涂和火焰喷涂在低碳钢表面制备巴氏合金涂层,

① 收稿日期:2022-08-22

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020QE145)

作者简介:郑军武(1970—),男,安徽安庆人,硕士,副教授,主要研究方向为汽车控制技术及CMT堆焊。

结果表明热喷涂涂层的孔隙率和组织细化程度均高于常规涂层,且具有良好的耐磨性。文献[6]通过激光熔覆技术在 45 钢基材表面制备带有镍过渡的巴氏合金熔覆层,提高了巴氏合金的耐磨性能。然而,由于热喷涂与基体的结合方式为机械结合,涂层结合强度较低;同时激光熔覆涂层由于成本较高不适合用于制备轴瓦产品^[7]。

电弧冷金属过渡(Cold Metal Transfer,简称 CMT)技术是一种热输入较低的堆焊技术^[8-10],它避免了传统堆焊热输入较大引起的焊渣飞溅,提高了熔池的冷却速率,从而提高了堆焊层的力学性能^[11-13]。文献[14]采用 CMT 和等离子喷焊工艺在 H13 模具钢表面制备 Stellite 21 堆焊层,结果表明,CMT 工艺较低的热输入使堆焊层的组织更为细化,提高了涂层的显微硬度和耐磨性。文献[15]通过 CMT 技术在铸钢表面制备巴氏合金堆焊层,堆焊层与基体间形成了冶金结合层,提高了巴氏合金堆焊层与基体间的结合强度。本文通过 CMT 技术,在钢基材表面制备巴氏合金堆焊层,分别对堆焊层的组织、相组成、硬度及摩擦学性能进行研究,为 CMT 技术制备轴瓦用巴氏合金堆焊层的磨损行为和磨损机理研究提供理论支撑。

1 实 验

以 20 钢为基材,基材尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm。堆焊用焊丝为 Φ1.2 mm 的 SnSbCu11-6 商用焊丝,其化学成分见表 1。巴氏合金堆焊层的制备选用 CMT-P 模式,在焊机(TPS 4000 CMT, Fronius)和送丝系统(VR 7000 CMT, Fronius)上进行。堆焊前,对基材表面进行打磨,以去除氧化皮,并用丙酮清洗。采用多道次焊接,叠合率为 30%,沉积率约为 34.1 kg/h。经过系统实验得到的具体工艺参数如表 2 所示。经过优化后的工艺参数可有效避免因热量输入过低或过高而形成气孔、裂纹、变形、飞溅等缺陷,从而获得较高的成形性。

表 1 SnSbCu11-6 巴氏合金焊丝化学成分(质量分数) %

Sb	Cu	Zn	As	Bi	Al	Sn
11.17	6.09	0.3	0.002	0.005	0.001	余量

表 2 巴氏合金 CMT 堆焊工艺参数

电流/ A	电压/ V	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	焊丝干伸长/ mm	氩气流量/ (L·min ⁻¹)	摇摆幅度/ mm
100	26	600	14	25	5

采用电火花线切割机对巴氏合金熔覆层进行取样。利用 X 射线衍射仪(XRD, XRD-7000, 岛津)测试样品物相组成。通过标准金相制备方法制备金相试样。采用光学显微镜(OM)和场发射扫描电子显微镜(SEM, Gemini300)观察样品微观结构。利用能谱仪(EDS)检测元素分布。采用维氏显微硬度计(HVS-1000)测试堆焊层截面显微硬度,载荷为 100 g,加载时间为 15 s。采用往复式摩擦磨损试验机对巴氏合金堆焊层进行常温干摩擦磨损试验,试验时间为 30 min,载荷为 300 g,往复速率为 60 次/min,磨痕长度为 7 mm。利用扫描电子显微镜对磨痕形貌进行观察,分析堆焊层磨损机理。巴氏合金堆焊层的比磨损率计算方法^[16]如下:

$$W = \frac{V}{S \times L} \tag{1}$$

式中 W 为比磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; V 为磨损体积, μm^3 ; S 为磨损长度, m ; L 为施加载荷, N 。

2 实验结果与讨论

2.1 相组成及微观结构

图 1 为巴氏合金堆焊层 XRD 衍射图谱。由图 1 可见,巴氏合金堆焊层由固溶体 $\alpha\text{-Sn}$ 相、硬质点 SnSb 相和 Cu_6Sn_5 相组成。由此可见,相较于离心铸造、激光熔覆等方式制备的巴氏合金,CMT 堆焊并未改变巴氏合金堆焊层的相结构,保证了巴氏合金本身所具有的优异性能。

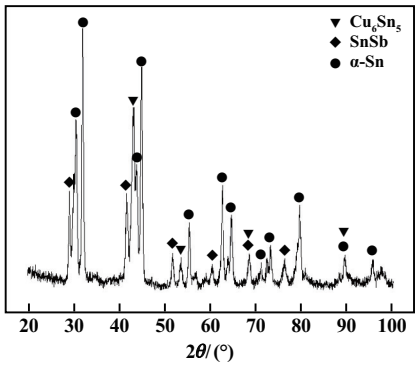
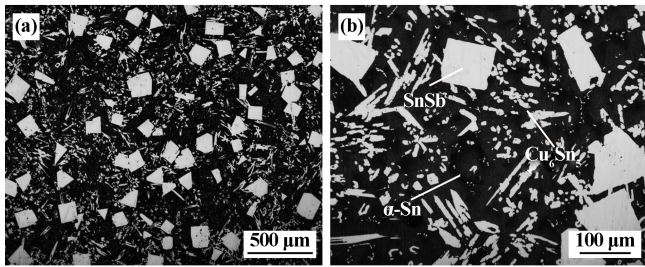


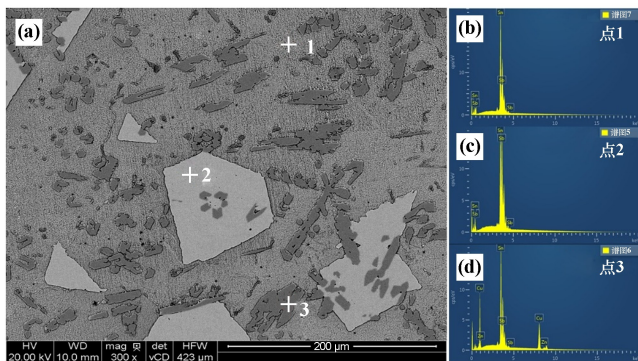
图 1 巴氏合金堆焊层 XRD 衍射图谱

巴氏合金堆焊层金相组织如图 2 所示。图中可以观察到方块状组织、细小棒状组织和黑色基体组织,推断方块组织为 SnSb ,棒状组织为 Cu_6Sn_5 ,黑色基体相为 $\alpha\text{-Sn}$ 。其中, SnSb 相和 Cu_6Sn_5 相为硬质点相,在磨损时起支撑作用, $\alpha\text{-Sn}$ 相为软基体相,在磨损时向下凹陷,起到潜藏作用。



(a) 低倍金相图; (b) 高倍金相图
图2 巴氏合金堆焊层金相组织

图3为巴氏合金堆焊层组织形貌及元素分布。在图中可以看到方块状组织、棒状组织和基体组织。分别对3处组织进行EDS点分析,在方块状组织处主要富集了Sn元素和Sb元素,并未发现Cu元素,结合XRD结果,方块状组织为SnSb相;基体相点1主要为Sn元素,并有少量Sb元素,结合XRD图谱表明基体相为 α -Sn固溶体,且少量Sb原子固溶在 α -Sn中,起到固溶强化的作用;棒状组织中主要富集了Sn元素和Cu元素,表明棒状组织为 Cu_6Sn_5 相。



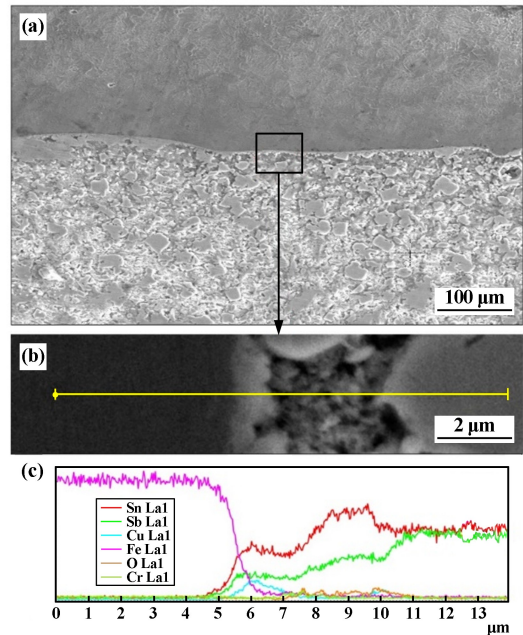
(a) 巴氏合金堆焊层 SEM 图片; (b) 点1处 EDS 分析;
(c) 点2处 EDS 分析; (d) 点3处 EDS 分析

图3 巴氏合金堆焊层组织形貌及元素分布

图4为巴氏合金堆焊层与基材结合区形貌和元素分布图。由图4可知,基体与巴氏合金堆焊层形成了一条较为平整的冶金结合线,表明巴氏合金堆焊层与基体间形成了良好的冶金结合,相较于离心铸造、静止浇筑等传统工艺,CMT堆焊巴氏合金提高了堆焊层与基体间的结合强度,从而提升了巴氏合金堆焊层的使用寿命。堆焊层与基体形成了约1 μm 的结合层。结合元素分析可以发现,少量的Fe元素扩散到了巴氏合金堆焊层中,基体中的Fe元素与巴氏合金堆焊层中的Sn元素结合形成了Fe-Sn金属间化合物,提升了堆焊层与基体的结合强度。

2.2 显微硬度

巴氏合金堆焊层截面显微硬度曲线如图5所示。



(a) 巴氏合金堆焊层与20钢基材结合区形貌;
(b) 结合区高倍图; (c) 元素线扫描图

图4 巴氏合金堆焊层与基材结合区形貌和元素分布

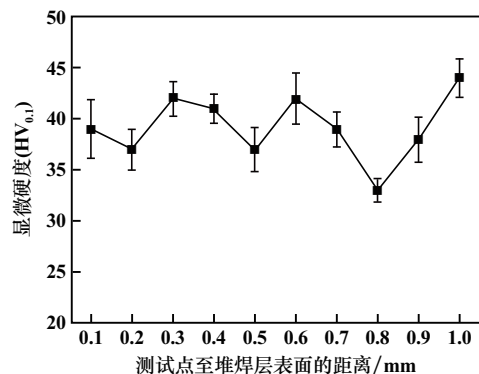


图5 巴氏合金堆焊层截面显微硬度

巴氏合金堆焊层的显微硬度约为 $40\text{HV}_{0.1}$,而传统的铸造巴氏合金显微硬度约为 $30\text{HV}_{0.1}$,表明通过CMT堆焊制备的巴氏合金堆焊层显微硬度明显升高。这可能是由于CMT堆焊技术提高了巴氏合金层的冷却速度,细化了巴氏合金堆焊层的组织,从而提升了巴氏合金堆焊层的显微硬度。根据经典的Hall-Petch公式^[17]:

$$H_g = H_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 H_0 、 k 为常数; d 为晶粒平均尺寸, μm 。材料的硬度与晶粒尺寸成反比,晶粒细化导致了巴氏合金堆焊层硬度的提高。

2.3 磨损形貌及磨损机理

巴氏合金堆焊层和铸造巴氏合金的干滑动摩擦因数曲线如图6所示。堆焊层和铸造巴氏合金的平均摩擦因数分别为0.31和0.43。铸造巴氏合金的摩擦因

数波动较大,而巴氏合金堆焊层的摩擦因数在磨损初期急速升高后,随磨损时间增加而逐渐下降,这可能是由于巴氏合金堆焊层硬度较高,提升了堆焊层抵抗变形的能力,因此在磨损初期,摩擦因数显著提升;而铸造巴氏合金硬度较低,抵抗变形能力较差,磨损前期摩擦因数波动较小,而随着磨损加剧,硬质点颗粒脱落,铸造巴氏合金与对磨球的相对摩擦力升高,从而提高了合金的摩擦因数。

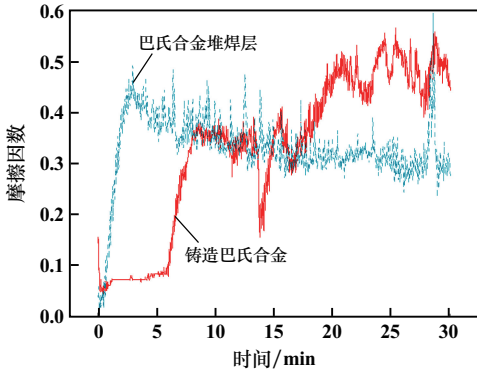


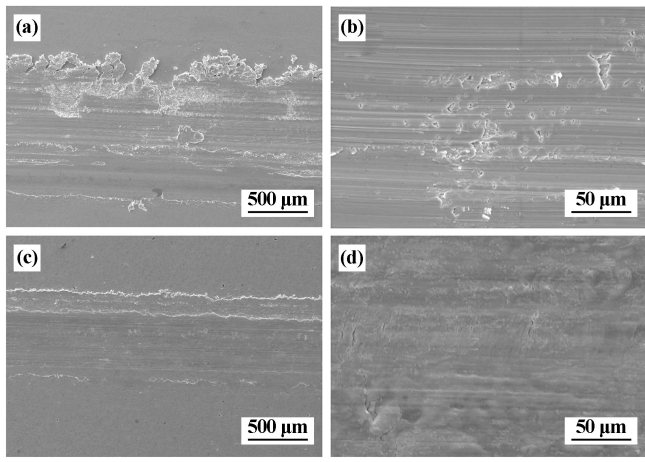
图 6 巴氏合金堆焊层和铸造巴氏合金摩擦因数曲线

根据式(1)计算所得巴氏合金堆焊层和铸造巴氏合金的磨损体积和比磨损率如表 3 所示。结果表明,巴氏合金堆焊层比铸造巴氏合金具有更优异的耐磨性。

表 3 巴氏合金堆焊层和铸造巴氏合金磨损体积和比磨损率

合金种类	平均磨损体积/ μm^3	平均比磨损率/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
铸造巴氏合金	8.55×10^7	2.47×10^{-5}
巴氏合金堆焊层	4.66×10^7	1.38×10^{-5}

为揭示巴氏合金堆焊层的磨损机理,对巴氏合金堆焊层和铸造巴氏合金的磨损表面进行 SEM 观察,结果如图 7 所示。由图 7 可知,铸造巴氏合金磨痕表面



(a),(b) 铸造巴氏合金; (c),(d) 巴氏合金堆焊层
图 7 巴氏合金堆焊层铸造巴氏合金磨痕形貌

有深且密集的犁沟和脱落坑,在磨痕上端有许多因磨损而脱落的碎屑,表明铸造巴氏合金的磨损机理主要为磨粒磨损和黏着磨损。巴氏合金堆焊层的犁沟浅且稀疏,且没有明显的碎屑和脱落坑,堆焊层的磨损机制以磨粒磨损为主。根据 Archard 定律^[18-20],材料的耐磨性与硬度成正比,随着硬度提升,堆焊层的抗变形能力提高,堆焊层耐磨性提高。此外,根据实际工况,黏着磨损是导致铸造巴氏合金轴瓦报废的主要因素,而 CMT 堆焊巴氏合金则可有效改善巴氏合金的磨损机制,避免黏着磨损的发生。因此,通过 CMT 堆焊技术可有效提高巴氏合金轴瓦的耐磨性和使用寿命。

3 结 论

- 1) 巴氏合金堆焊层相组成为硬质点颗粒 SnSb 相、 Cu_6Sn_5 相和软基体 $\alpha\text{-Sn}$ 相。
- 2) 由于热输入的降低,巴氏合金堆焊层的冷却速率提高,巴氏合金组织发生细化,从而提高了巴氏合金堆焊层的显微硬度,巴氏合金堆焊层的平均显微硬度约为 $40.1\text{HV}_{0.1}$,远高于铸造巴氏合金的显微硬度 ($30\text{HV}_{0.1}$)。
- 3) 巴氏合金堆焊层的磨损体积和比磨损率分别为 $4.66 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ 和 $1.38 \times 10^{-5} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,优于铸造巴氏合金 ($8.55 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ 和 $2.47 \times 10^{-5} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)。
- 4) 巴氏合金堆焊层的磨损机理为磨粒磨损。

参考文献:

[1] DONG Q, YIN Z, LI H, et al. Simulation and experimental verification of fatigue strength evaluation of journal bearing bush[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,109:104275.

[2] Okamura Y, Ikoma K, Nagatomo T. Preventive measures of fretting wear in railway axle bearings: Combined effect of grooving and amorphous carbon coating towards their backing rings[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,137:106356.

[3] Pujiyulianto E, Muhyi A, Paundra F, et al. Failure analysis of a wear ring impeller[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,138:106415.

[4] HE Y, ZHAO Z, LUO T, et al. Failure analysis of journal bearing used in turboset of a power plant[J]. Materials and Design, 2013, 52:923-931.

[5] Alcover P R C, Pukasiewicz A G M. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes[J]. Tribology International, 2019,131: 148-157.

[6] 许桐舟,张 陈,孙长青,等. 激光熔覆镍/锡基巴氏合金的显微组织及力学性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020,57,662(3): 155-162.

[7] 陈伟栋,汪冰峰,朱协彬,等. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢组织控制研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):153-157.

(下转第 159 页)

3.6 协同机理

协同机理或称役使效应,是指在大系统中存在的一个或多个子系统,对其他系统能够产生重要作用,能够支配与影响其他系统的运行方式。一是系统内部各个组成要素形成一个有机整体,使该系统中各元素之间的关系变得和谐融洽,协调一致,使每一组分相对稳定的发挥积极作用,维系系统循环发展。二是加强系统同外部环境交换信息、能量与物质的功能,不断修正循环经济系统内部各组成要素间的机构与组织关系,使其与外部环境形成动态平衡。三是通过获取与加工变换信息的能力,增强循环系统的内部作用,降低系统的混乱程度,从而使系统保持更长时间的有序状态或者提高系统的有序程度,增强循环经济系统的功能。湖矿区分布式生态系统是在结合湖矿区特点的基础上,对区内的水资源、土地资源、人力资源、能源资源等方面协调开发利用,进行农业、采矿业、旅游业及其他相关产业的协同发展,实现内外环境的协调发展,保证湖矿区生态体系的健康运行。

4 结 论

随着客观环境变化,生态体系生存环境应该适时

进行调整或转变,湖矿区应根据煤矿的生命周期有计划有步骤地进行生态系统建设,实现煤矿附属资源的边开采边利用、环境可持续发展和经济增长。本文研究的生命周期机理、代谢机理、平衡机理、组合机理、共享机理、协同机理为分布式湖矿区生态体系的调整与发展提供了理论依据,也为该系统的正常运行提出了合理建议。

参考文献:

- [1] 于晓燕,鞠 萍,任一鑫,等. 分布式矿区生态集成体系建设研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):151-155.
- [2] 于晓燕. 矿农协同生态体系构建与评价研究[D]. 青岛:山东科技大学经济管理学院, 2020.
- [3] 任一鑫,苏海洋. 矿区资源循环绿色体系构建[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):138-142.
- [4] 焦习燕,王志远,任一鑫. 高温深井煤矿降温系统集成体系研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(1):127-131.
- [5] 蔡美峰,吴允权,李 鹏,等. 宁夏地区煤炭资源绿色开发现状与思路[J]. 工程科学学报, 2022,44(1):1-10.
- [6] 崔 艳,麦方代. 小保当煤矿智慧矿山生态环境防治体系建设模式研究[J]. 煤炭工程, 2017,49(5):20-23.

引用本文: 鞠 萍,李宜伟,于晓燕,等. 湖矿区分布式生态系统运行机理研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):154-159.

(上接第153页)

- [8] SHI X W, YU K, JIANG L, et al. Microstructural characterization of Ni-201 weld cladding onto 304 stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2018,334:19-28.
- [9] Gurumoorthy K, Kamaraj M, Rao K P, et al. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007,456:11-19.
- [10] LIU Y F, FENG Z C, PU F, et al. Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC/CaF₂/γ-Ni self-lubricating wear-resistant composite coating produced by co-axial powder feeding plasma transferred arc (PTA) cladding process[J]. Surface and Coatings Technology, 2018,345:61-69.
- [11] Zunake L, Kalyankar V D. On the performance of weld overlay characteristics of Ni-Cr-Si-B deposition on 304 ASS using synergetic pulse-GMAW process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021,26:106-115.
- [12] Saroj S, Sahoo C K, Masanta M, et al. Microstructure and mechanical performance of TiC Inconel825 composite coating deposited on AISI 304 steel by TIG cladding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017,249:490-501.
- [13] Solecka M, Kopia A, Radziszewska A, et al. Microstructure, micro-segregation and nanohardness of CMT clad layers of Ni-base alloy on 16Mo3 steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018,751:86-95.
- [14] Rajeev G P, Kamaraj M, Bakshi R. Comparison of microstructure, dilution and wear behavior of Stellite 21 hardfacing on H13 steel using cold metal transfer and plasma transferred arc welding processes[J].

Surface and Coatings Technology, 2019,375:383-394.

- [15] 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.
- [16] ZHANG H, PAN Y J, ZHANG Y, et al. Effect of laser energy density on microstructure, wear resistance, and fracture toughness of laser clad Mo₂FeB₂ coating[J]. Ceramics International, 2022,48:28163-28173.
- [17] Aghajani H, Valefi Z, Zamani P. Phase composition, microstructure, mechanical properties, and wear performance of nanostructured Al₂O₃ and Al₂O₃-Y₂O₃ coatings deposited by plasma spraying[J]. Applied Surface Science, 2022,585:152754.
- [18] YANG L, LI Z, ZHANG Y, et al. In-situ TiC-Al₃Ti reinforced Al-Mg composites with Y₂O₃ addition formed by laser cladding on AZ91D[J]. Surface and Coatings Technology, 2020,383:125249.
- [19] LI J, LUO X, LI G J. Effect of Y₂O₃ on the sliding wear resistance of TiB/TiC reinforced composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Wear, 2014,310:72-82.
- [20] LIANG C, WANG C, ZHANG K, et al. Nucleation and strengthening mechanism of laser cladding aluminum alloy by Ni-Cr-B-Si alloy powder based on rare earth control[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021,294:117145.

引用本文: 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.